

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Vinceković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc.dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Luka Vinceković

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Goranu Krajačiću kako na pomoći i korisnim savjetima tako i na izdvojenom vremenu prilikom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem i prof.dr. sc. Ljubomiru Majdandžiću na pruženim podacima.

Luka Vinceković

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Luka Vinceković

Mat. br.: 0035188884

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza proizvodnje električne energije iz sunčanih elektrana u Republici Hrvatskoj**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of electricity production from the solar power plants in Republic of Croatia**

Opis zadatka:

Početkom kolovoza 2015. godine u Republici Hrvatskoj (RH) je bilo instalirano 1155 sunčanih elektrana ukupne snage 40,391 MW. Navedene elektrane su bile u sustavu poticaja te je ukupna instalirana snaga svih fotonaponskih sustava u RH sigurno veća, no teško da prelazi 50 MW. U svijetu trend instalacije sunčanih elektrana značajno raste te se godišnje instalira između 35-40 GW. Uz značajan potencijal Sunčevog zračenja u RH te sve niže troškove fotonaponskih sustava i mogućnosti korištenja sunčanih elektrana za vlastite potrebe, kao i dodatnu prodaju viškova u mrežu te otvoreno veleprodajno tržište električnom energijom, očekuje se znatan porast instaliranih postrojenja u RH. Radi određivanja mogućnosti prihvata energije iz sunčanih elektrana u elektroenergetski sustav, potrebno je izvršiti detaljne analize podataka o povijesnoj proizvodnji te na temelju toga analizirati mogućnost povećanja instalirane snage sunčanih elektrana.

U radu je potrebno:

1. Napraviti analizu podataka o proizvodnji električne energije iz minimalno 10 instaliranih sunčanih elektrana ili fotonaponskih sustava u sustavu poticanja proizvodnje električne energije na teritoriju Republike Hrvatske, u što manjoj vremenskoj rezoluciji.
2. Napraviti analizu podataka o Sunčevu zračenju i dozračenju energiji iz dostupnih baza podataka.
3. Prema 1. i 2. napraviti satne distribucijske krivulje proizvodnje električne energije iz sunčanih elektrana te usporediti krivulje s dostupnim distribucijama u EnergyPLAN programu.
4. Analizirati mogućnost integracije električne energije iz sunčanih elektrana prema prikupljenim podacima te raspoloživim proračunima modela energetskog sustava RH u EnergyPLAN programu.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS JEDNADŽBI	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1 Značajke i opis Republike Hrvatske.....	1
1.2 Energetska situacija i sunčane elektrane u Republici Hrvatskoj.....	1
1.3 Problematika rada.....	3
2. METODE	5
2.1 Sunnyportal	6
2.1.1 Korišteni podaci iz Sunnyportala	6
2.2 Meteonorm	8
2.2.1 Korišteni podaci iz Meteonorma	8
2.3 PVGIS	9
2.3.1 Europski kontinent	10
2.3.2 Mediteran, Afrika i jugozapadna Azija	11
2.3.3 Korišteni podaci s PVGIS-a	11
2.4 EnergyPlan	12
3. ANALIZA ULAZNIH PODATAKA	14
3.1 Mjerenja 14 sunčanih elektrana.....	14
3.2 Meteonorm za 14 sustava.....	15

3.3 PVGIS za 14 sustava	16
3.4 EnergyPlan distribucija fotonaponskih sustava.....	18
3.5 Potrošnja električne energije u RH za 2014. godinu	19
4. REZULTATI.....	21
4.1 Analiza proizvodnje električne energije iz sunčanih elektrana	21
4.1.1 Analiza rada i proizvodnje sunčane elektrane INES	21
4.1.2 Analiza rada i proizvodnje sunčane elektrane Solarni stup Špansko	26
4.2 Ukupna analiza rada sunčanih elektrana	28
4.3 Mogućnost integracije električne energije iz sunčanih elektrana.....	33
5. ZAKLJUČAK	37
6. LITERATURA.....	38
PRILOZI.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Insolacija u RH [6]	2
Slika 2. Geografski prikaz lokacija analiziranih elektrana	4
Slika 3. Proizvodnja FN sustava IZO staklo	6
Slika 4. Dozračena energija na lokaciju sunčane elektrane FN IZO staklo za 2005. godinu	9
Slika 5. Izgled korisničkog sučelja PVGIS	10
Slika 6. Primjer podataka iz PVGIS-a za elektranu FN sustav IZO staklo	12
Slika 7. Shematski prikaz EnergyPlan programa	13
Slika 8. Mjerenja 14 sustava	15
Slika 9. Prikaz dozračene energije za 14 sustava iz baza Meteonorma	16
Slika 10. Krivulja mjesečne proizvodnje električne energije za 14 sustava po PVGIS-u	17
Slika 11. Distribucija iz EnergyPlana za 2014. godinu za Republiku Hrvatsku	18
Slika 12. Potrošnja električne energije u 2014. za RH	20
Slika 13. Proizvodnja električne energije sunčane elektrane INES za 2014. godinu	22
Slika 14. Dozračena energija za elektranu INES iz baza Meteonorma	22
Slika 15. Usporedba podataka o proizvodnji električne energije iz mjerenih izvora i Meteonorma za sunčanu elektranu INES	24
Slika 16. Mjesečna usporedba proizvodnje električne energije iz mjerenih podataka, Meteonorma i PVGIS-a sunčane elektrane INES	25
Slika 17. Proizvodnja električne energije sunčane elektrane Solarni stup Špansko za 2014. godinu	26
Slika 18. Usporedba podataka o proizvodnji električne energije iz mjerenih izvora i Meteonorma za sunčanu elektranu Solarni stup Špansko	27

Slika 19. Mjesečna usporedba proizvodnje električne energije iz mjerenih podataka, Meteonorma i PVGIS-a sunčane elektrane Solarni stup Špansko	28
Slika 20. Prikaz usporedbe podataka o mjerenju proizvodnje električne energije i podataka o dozračenoj energiji iz baza Meteonorma.....	29
Slika 21. Prikaz usporedbe podataka o mjerenju proizvodnje električne energije, podataka o dozračenoj energiji iz baza Meteonorma te distribucije iz EnergyPlana	30
Slika 22. Usporedba podataka mjerenih podataka i podataka iz baza Meteonorma za sve analizirane elektrane.....	31
Slika 23. Usporedba podataka mjerenih podataka i podataka iz PVGIS-a za slučaj sunčane elektrane INES	32
Slika 24. Rast CEEP-a u ovisnosti i kapacitetima instaliranih sunčanih elektrana.....	34
Slika 25. Rast CEEP-a u ovisnosti o kapacitetima instaliranih sunčanih elektrana i geografskoj lokaciji elektrana za usporedbu dozračene energije iz baza Meteonorma	35
Slika 26. Rast CEEP-a u ovisnosti o kapacitetima instaliranih sunčanih elektrana i geografskoj lokaciji elektrana za usporedbu podataka o proizvedenoj električnoj energiji preuzetih sa Sunnyportalu	36

POPIS JEDNADŽBI

Jednadžba 1.	.....	14
Jednadžba 2.	.....	14
Jednadžba 3.	.....	15
Jednadžba 4.	.....	16
Jednadžba 5.	.....	17
Jednadžba 6.	.....	17
Jednadžba 7.	.....	19
Jednadžba 8.	.....	22
Jednadžba 9.	.....	30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
D_h	[kWh]	proizvedena mjerena električna energija u satu iz mjerenih podataka
$D_{h,max}$	[kWh]	maksimalna satna proizvedena električna energija u godini iz mjerenih podataka
$D_{PV,h,k}$	[-]	kvocijent proizvedene električne energije u pojedinom satu iz mjerenih podataka
D_{sum}	[-]	zbroj $D_{PV,h}$ mjerenih vrijednosti za 14 analiziranih elektrana
E_h	[kWh]	dozračena energija u satu iz baza Meteonorma
$E_{h,max}$	[kWh]	maksimalna satna dozračena energija u godini iz baza Meteonorma
$E_{PV,h,k}$	[-]	kvocijent dozračene energije u pojedinom satu iz baza Meteonorma
E_{sum}	[-]	zbroj $E_{PV,h}$ vrijednosti za 14 analiziranih elektrana
H_m	[kWh]	proizvedena električna energija u mjesecu iz baza PVGIS-a
$H_{m,max}$	[kWh]	maksimalna mjesečna proizvedena električna energija u godini iz baza PVGIS-a
$H_{PV,m,k}$	[-]	kvocijent dozračene energije u pojedinom mjesecu iz baza PVGIS-a
H_{sum}	[-]	zbroj $H_{PV,m}$ vrijednosti za 14 analiziranih elektrana

A	[m ²]	površina solarnih panela sunčane elektrane
η	[-]	ukupna iskoristivost sunčane elektrane

SAŽETAK

Dok nova Europska direktiva za 2030. godinu za okoliš i energetiku zahtijeva smanjenje emisije stakleničkih plinova za minimalno 40% u odnosu na razinu emisije stakleničkih plinova iz 1990. godine, Republika Hrvatska nije agresivno krenula u implementaciju obnovljivih izvora energije kao ostale europske zemlje. Veliki pad cijena ali i razvitak fotonaponskih sustava te trend prelaska na obnovljive izvore energije postavlja sunčevu energiju kao rješenje na koje ćemo se sve više oslanjati u budućnosti. Budući da je Republika Hrvatska velikim dijelom sredozemna zemlja, ima velike mogućnosti implementacije fotonaponskih sustava u elektroenergetsku mrežu. Ovaj rad će analizirati proizvodnju odabranih 14 postojećih sunčanih elektrana za 2014. godinu. Elektrane su birane po zahtjevu da se dobije što bolja geografska slika Hrvatske tako da je pokriven kontinentalni i sredozemni dio zemlje.

Nadalje, napravljene su analize dozračene energije za sve lokacije elektrana iz dostupnih baza podataka PVGIS i Meteonorm te su ti podaci uspoređeni s podacima o proizvodnji u satnoj rezoluciji.

Također, podaci o proizvodnji u satnoj rezoluciji uspoređeni su s distribucijom dobivenom u EnergyPlan programu.

Na kraju, analizirana je mogućnost proširenja kapaciteta sunčanih elektrana u elektroenergetskom sustavu koristeći podatke o potrošnji električne energije u RH za 2014. godinu i dostupne distribucije u EnergyPlan programu.

Provedene analize pokazale su da elektrana s dvoosnim praćenjem Sunca postiže maksimalne satne vrijednosti proizvodnje električne energije kroz cijelu godinu, ali i da lokacija instaliranih elektrana u Republici Hrvatskoj gotovo uopće nema utjecaja na ukupan iznos proizvedene električne energije.

Ključne riječi: sunčane elektrane, Republika Hrvatska, proizvodnja električne energije, EnergyPlan, Meteonorm, PVGIS, električna energija, analiza

SUMMARY

While the new 2030 European framework for climate and energy requires a reduction in greenhouse gas emissions by at least 40% compared to the 1990 level, the Republic of Croatia did not tackle the implementation of renewable energy sources like other European countries. Development and increase of price drop of photovoltaic systems, and also switching to renewables, are setting the energy of the Sun as solution that we will rely on in the future. Since, the Republic of Croatia is also a mediterranean country, it has great possibilities to implement the photovoltaic systems into it's electrical grid. This paper will analyze the produciton of the 14 existing solar power plants for year 2014. The solar power plants were carefully chosen to give the best possible geographic image of Croatia, including both the continental and the mediterranean part of the country.

Furthermore, analysis of radiated energy were performed for all power plants locations from avaiable data bases PVGIS and Meteonorm and this data were compared with informations of electricity production in hour resolution.

Also, data of electricity production were compared with distributions gained in EnergyPlan program.

At the end, possibility of widening solar power plants in the power system was analyzed using the data of electricity consumption in 2014. in Croatia and avaiable distributions in EnergyPlan program.

Analyses showed that the two-axis solar power plant achieves maximum hourly values of electricity production through the whole year, but also that the location of installed power plants in Croatia, has almost no effect on the total amount of generated electricity.

Key words: solar power plants, Republic of Croatia, electrical energy production, EnergyPlan, Meteonorm, PVGIS, electrical energy, analysis

1. UVOD

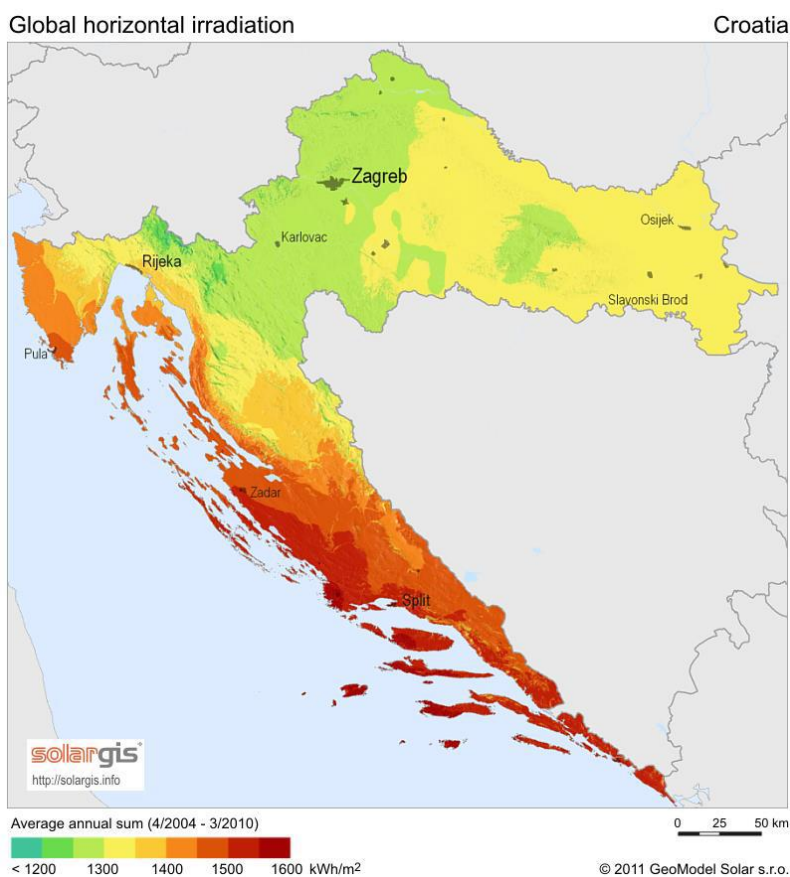
1.1 Značajke i opis Republike Hrvatske

Republika Hrvatska zauzima kopnenu površinu od 56 542 km². Duljina obalne linije iznosi 5835 km. Republika Hrvatska u svom sastavu ima 1 185 otoka od kojih je 67 naseljenih [1]. Prema popisu stanovništva iz 2011. godine Hrvatska ima 4 284 889 stanovnika [2]. BDP po glavi stanovnika za 2014. godinu iznosio je 21 169 \$. Klima je u unutrašnjosti Hrvatske umjereno kontinentalna, u gorskoj Hrvatskoj pretpplaninska i planinska, u primorskom dijelu mediteranska sa suhim i toplim ljetima te vlažnim i blagim zimama, a u zaleđu submediteranska s nešto hladnijim zimama i toplijim ljetima. Na klimu Hrvatske utječe položaj u sjevernom umjerenom pojasu. Prosječna temperatura u unutrašnjosti: siječanj 0 do 2°C, kolovoz 19 do 23°C, dok je prosječna temperatura u primorju: siječanj 6 do 11°C, kolovoz 21 do 27°C. S prosječno 2 600 sunčanih sati u godini jadranska je obala jedna od najsunčanijih u Sredozemlju, dok u kontinentalnom dijelu Hrvatske uglavnom nema više od 2000 sunčanih sati godišnje [3].

1.2 Energetska situacija i sunčane elektrane u Republici Hrvatskoj

Energetska slika Republike Hrvatske daleko je od idealne. Uvoz primarne energije je malo veći od polovine ukupne godišnje potrošene primarne energije. Dio električne energije koji se proizvodi u Republici Hrvatskoj dolazi većinom iz hidroelektrana koje su prilično zastupljene jer vodeni potencijal Republike Hrvatske velikim dijelom iskorišten, te iz starih termoelektrana na ugljen i termoelektrana na plin. Do 2030. planira se ugasiti stare termoelektrane koje koriste mazut i ugljen u Republici Hrvatskoj [4]. U 2014. godini ukupno je u elektranama HEP Proizvodnje d.o.o. proizvedeno 9805 GWh električne energije, od toga u hidroelektranama 8355 GWh ili 74,3 %, a u termoelektranama 1 450 GWh ili 12,9 % [5]. Ako se uistinu obistine prognoze o gašenju starih termoelektrana do 2030. godine u Republici Hrvatskoj znači da treba naći način za nadoknadu skoro 1 500 GWh električne energije godišnje uz pretpostavku da potrošnja električne energije neće značajno rasti te da nećemo proširivati uvoz energije.

Zadnjih godina sve je snažniji trend prelaska na obnovljive izvore a to uzima maha i u Republici Hrvatskoj. Sunčane elektrane doživljavaju pravi procvat, 2012. godine u Republici Hrvatskoj bilo je instalirano 3,95 MW sunčanih elektrana a ta brojka je do 2015. povećana na 40,391 MW što je porast od više od deset puta. Treba napomenuti da je ta brojka vjerojatno i veća, jer ova navedena snaga instaliranih elektrana uključuje samo one elektrane koje su u sustavu poticajne cijene otkupa električne energije, ali teško da prelazi 50 MW. Treba napomenuti da je ovo ipak jako loš rezultat promatran u okvirima Europske unije pošto Republika Hrvatska ima velike potencijale u sunčanim elektranama zbog svojeg geografskog položaja. Obalni dio s otocima koji imaju više od 2 600 sunčanih sati godišnje čini gotovo idealno područje za razvoj sunčanih elektrana.



Slika 1. Insolacija u RH [6]

1.3 Problematika rada

U ovom radu analizirano je 14 sunčanih elektrana smještenih u geografski različitim predjelima s ciljem dobivanja što šire i točnije slike mogućnosti integracije sunčanih elektrana u elektroenergetski sustav Republike Hrvatske.

Analizirane sunčane elektrane su:

- Čosić Sesvete (Sesvete)
- ETING (Sveta Nedelja)
- FN Seste Milosrdnice (Zaprešić)
- FN sustav IZO staklo (Šibenik)
- INES (Vinkovci)
- SE Kirinčić Njivice (Njivice)
- Petrokov 1 (Zagreb)
- Petrokov 2 (Zagreb)
- RED INTERNATIONAL (Velika Gorica)
- Sagitta Solers (Dugo Selo)
- SE Kozjak (Kaštel Sućurac)
- Solarni krov Špansko (Zagreb)
- Solarni stup Špansko (Zagreb)
- SE VUK (Karlovac)

U radu su korišteni podaci o proizvodnji električne energije svih navedenih sunčanih elektrana za 2014. godinu osim SE VUK i FN sustava IZO staklo gdje su prva četiri mjeseca 2014. godine zamijenjena s prva četiri mjeseca 2015. godine, te SE Kozjak gdje su prva dva mjeseca 2014. godine zamijenjena s prva dva mjeseca 2015. godine zbog nedostupnosti podataka.

Ovdje treba napomenuti da podaci o proizvedenoj električnoj energiji nisu u potpunosti točni zbog prekida u radu sustava za praćenje, ali to je kod analiziranih elektrana jako rijetka pojava. Naime, za neke elektrane postoje prazni podaci o proizvodnji, odnosno prikazano je

da u nekim danima ili satima nije bilo baš nikakve proizvodnje električne energije ali to zasigurno nije točno.

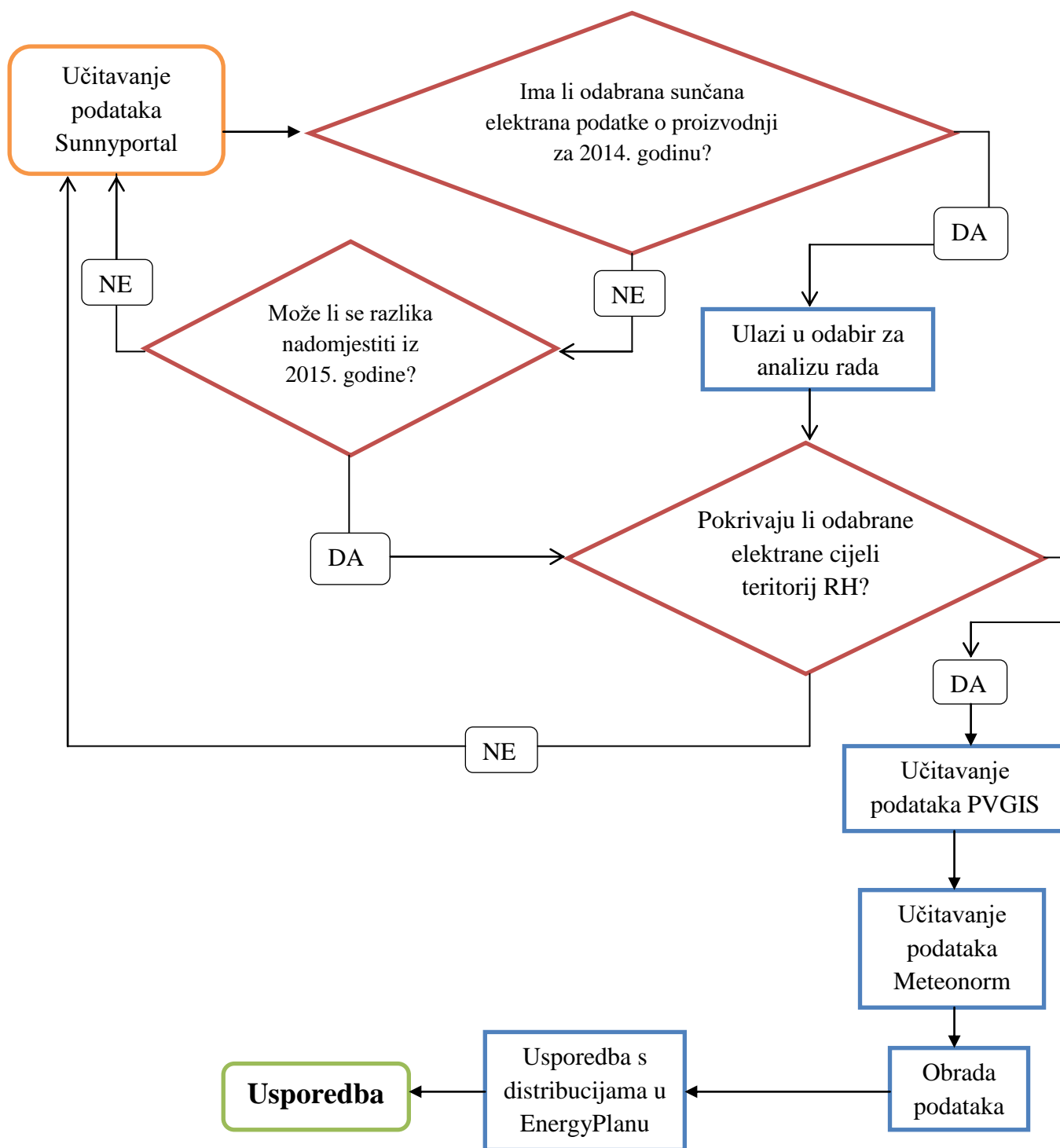
S obzirom da je bio omogućen uvid u proizvodnju ukupno 21 sunčane elektrane pri odabiru onih čije će se proizvodnje analizirati vodilo se računa o uvjetima da elektrana ima što potpunije podatke o proizvodnji te da se s odabranim elektranama što potpunije pokrije geografsko područje Republike Hrvatske kao što je vidljivo na slici 2. Velika je koncentracija elektrana oko Zagreba, a razlog tomu je što su te izabrane elektrane imale najpotpunije podatke o proizvodnji električne energije, a ipak je postignuta pokrivenost cijelog teritorija Republike Hrvatske barem jednom sunčanom elektranom.



Slika 2. Geografski prikaz lokacija analiziranih elektrana

2. METODE

Dijagram toka prikazuje postupak biranja sunčanih elektrana koje ulaze u analizu proizvodnje električne energije:

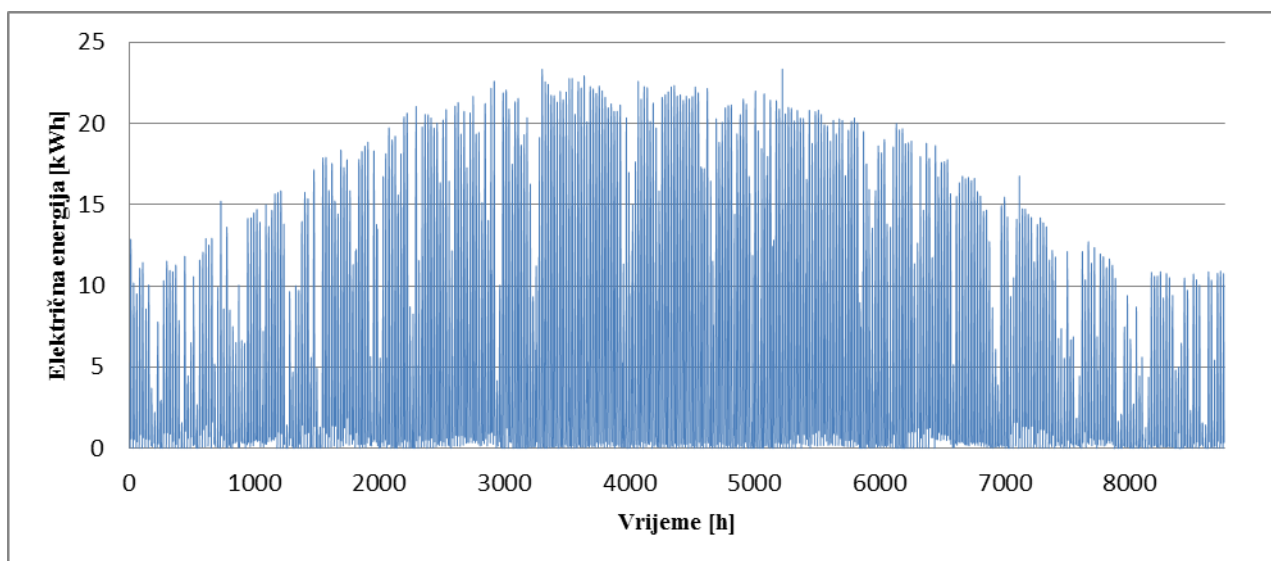


2.1 Sunnyportal

Podaci o proizvedenoj električnoj energiji preuzeti su sa stranice www.sunnyportal.com na kojoj se nalaze podaci o proizvedenoj električnoj energiji od puštanja elektrane u pogon, instaliranoj snazi, korištenoj opremi i lokaciji sunčane elektrane. Podaci o proizvedenoj električnoj energiji ažuriraju se na dnevnoj bazi. Sunnyportal pruža informacije o proizvedenoj električnoj energiji u satnoj, dnevnoj, tjednoj, mjesečnoj i godišnjoj rezoluciji. [7]

2.1.1 Korišteni podaci iz Sunnyportala

Pri analizi podataka o proizvedenoj električnoj energiji korištena je satna rezolucija. Pošto je raspon od jedne godine veliki uzorak, satna rezolucija, ukoliko se prati samo jedna elektrana zasebno nema veliki učinak, ali u kasnijoj fazi rada kad su analizirane elektrane međusobno i uspoređivane s dostupnim distribucijama u EnergyPlan-u, satna rezolucija došla je do izričaja.



Slika 3. Proizvodnja FN sustava IZO staklo

Na slici 3. vidljiva je proizvodnja sunčane elektrane FN sustav IZO staklo instalirane snage 30 kW. Elektrana je smještena na području grada Šibenika što znači da je u okvirima Republike Hrvatske pri samom vrhu broja sunčanih sati što je i vidljivo na slici 1. Proizvodnja sustava prikazana je u satnoj rezoluciji, u kWh/satu. Na slici se vidi da maksimalna satna proizvodnja FN sustava IZO staklo u ljetnim mjesecima iznosi oko 22 kWh i ostvaruje se oko

4000. sata u godini što otprilike odgovara kraju lipnja i početku srpnja. Isto tako se može vidjeti da proizvodnja varira iz dana u dan što može biti posljedica meteroloških uvjeta ali i prekida u sustavu mjerenja proizvedene električne energije. Maksimalna proizvedena električna energija po satu u ljetnom razdoblju razlikuje se od vrijednosti u zimskom razdoblju do dva puta što je vidljivo u tablici 1. Ovo se ne može reći za ukupnu proizvedenu električnu energiju u jednom danu gdje su vrijednosti u ljetnom razdoblju u prosjeku i do pet puta veće nego u zimskom razdoblju.

Tablica 1. Prikaz proizvodnje električne energije [kWh] FN sustava IZO staklo u ljetnom i zimskom razdoblju

	1.6.2014	2.6.2014	3.6.2014	1.12.2014	2.12.2014	3.12.2014
01.00						
02.00						
03.00						
04.00						
05.00						
06.00	0,07	0,08	0,07			
07.00	1,04	1,04	1,13			
08.00	4,49	4,27	4,52	0	0,19	0
09.00	9,28	9,21	9,26	0,07	1,34	0,29
10.00	14,43	13,86	13,8	1,02	2,42	0,38
11.00	17,02	17,53	17,38	1,41	5,43	3,06
12.00	19,76	20,1	20,07	2,68	8,7	3,25
13.00	19,2	16,82	21,73	2,26	5,39	4,45
14.00	22,93	12,07	22,26	0,63	5,02	2,92
15.00	19,78	10,96	21,57	2,73	2,87	3,32
16.00	14,4	9,1	19,48	0,96	0,45	1,56
17.00	8,4	2,97	16,28	0	0,01	0,09
18.00	1,82	2,78	11,95			
19.00	2,33	5,31	6,85			
20.00	1,76	2,54	2,12			
21.00	0,02	0,13	0,19			
22.00						
23.00						
24.00						
Σ	156,73	128,77	188,66	11,76	31,82	19,32

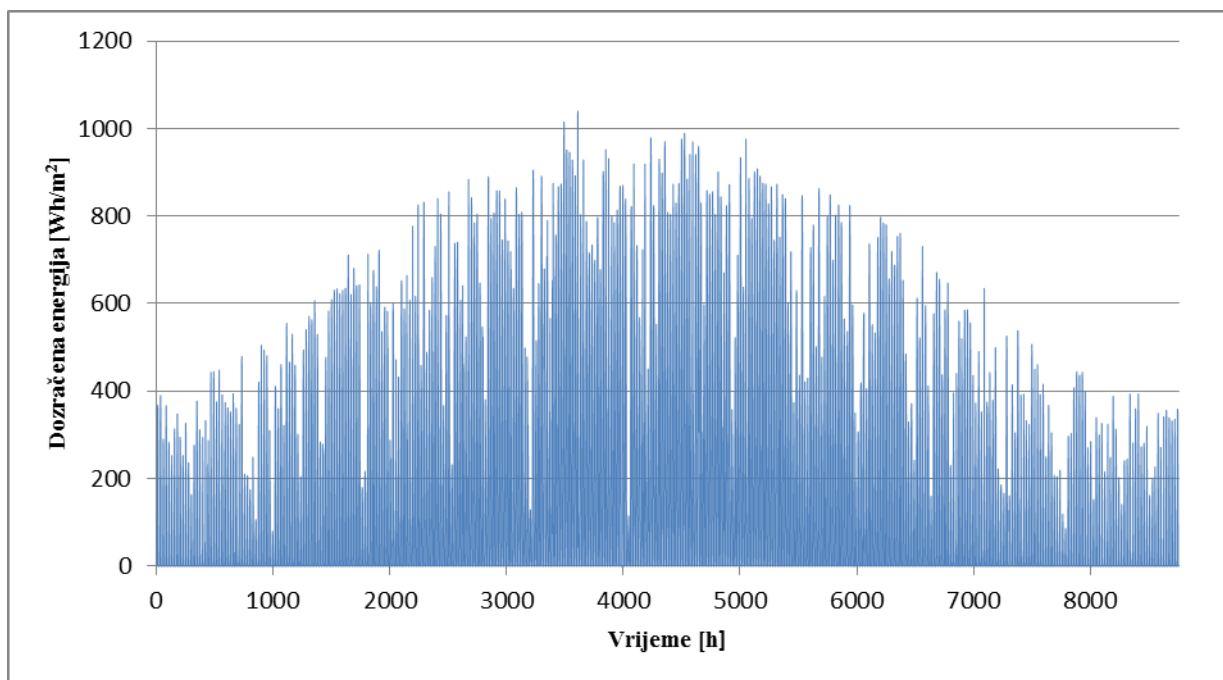
U tablici 1. prikazani su slučajno izabrani podaci o proizvodnji prva 3 dana mjeseca lipnja i prosinca 2014. godine. Vidi se da je ukupna dnevna proizvodnja u lipnju u prosjeku i više od pet puta veća od dnevne proizvodnje u zimskom razdoblju.

2.2 Meteonorm

Podaci o dozračenoj energiji preuzeti su iz programa Meteonorm. Meteonorm je program koji za lokaciju definiranu geografskom širinom i dužinom daje podatke o vremenskim uvjetima i dozračenoj energiji izražene u Wh/m^2 . Meteonorm podatke uzima iz više od 8 300 meteoroloških stanica od kojih je više od 1 600 smješteno u Europi. Podaci o dozračenoj energiji dostupni su za razdoblje od 1991. do 2010. godine, a ostali parametri su dostupni za razdoblje od 2000. do 2009. godine. Meteonorm za jedno područje pruža više od 30 različitih parametara. U radu su korišteni podaci o globalnom sunčevu zračenju na horizontalnu plohu.[8]

2.2.1 Korišteni podaci iz Meteonorma

Podaci su preuzeti za 2005. godinu u satnoj rezoluciji i uspoređivani su s mjerenim podacima o proizvedenoj električnoj energiji.

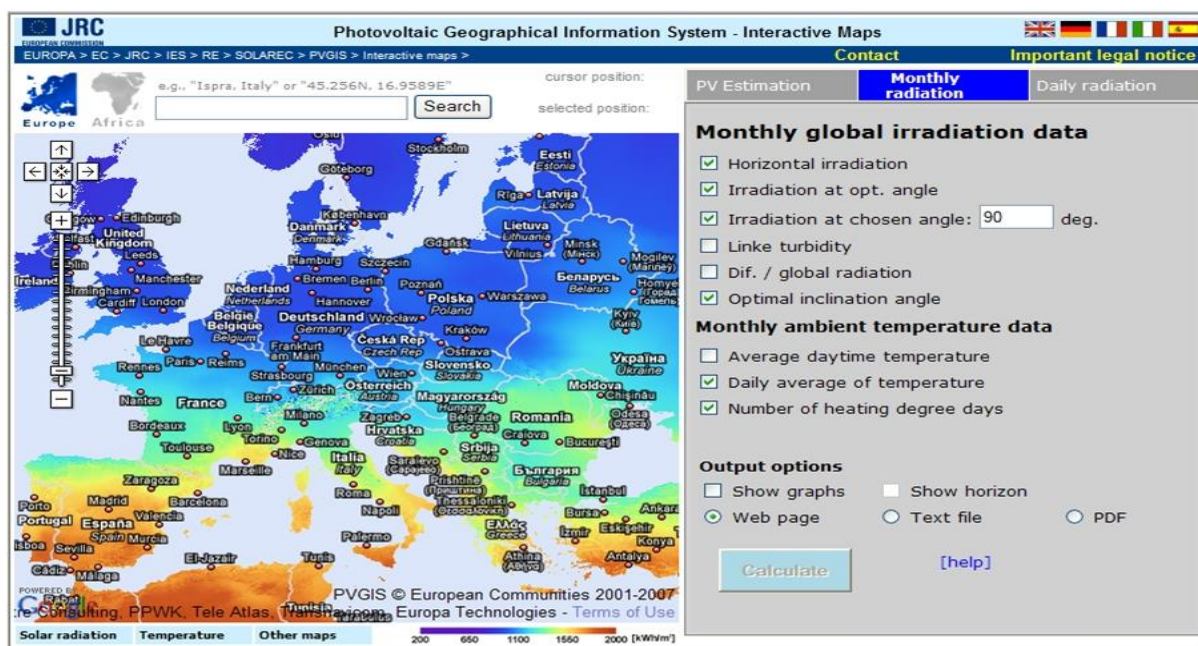


Slika 4. Dozračena energija na horizontalnu plohu na lokaciju sunčane elektrane FN IZO staklo za 2005. godinu

Na slici 4. prikazana je dozračena energija u satnoj rezoluciji izražena u Wh/m^2 za lokaciju sunčane elektrane IZO staklo u Šibeniku. Slično kao i u slučaju s mjerenim podacima o proizvodnji, ovdje se također vidi da su u zimskom razdoblju maksimalne dozračene vrijednosti otprilike dva do tri puta manje od dozračene energije u ljetnom razdoblju. Ono što se ne primjećuje na grafikonu, a također je izuzetno važno za naglasiti, jest da su samo maksimalne vrijednosti u zimskom razdoblju u odnosu na maksimalne vrijednosti u ljetnom razdoblju otprilike duplo manje, dok su prosječne dnevne vrijednosti u zimskom razdoblju i do četiri puta manje u odnosu na one u ljetnom. Ta odstupanja naravno variraju od godine do godine, ali vizualnom usporedbom oblika dviju krivulja zaključuje se da se slika 4. može usporediti sa slikom 3. bez obzira što slika 3. prikazuje 2005. godinu, a slika 4. 2014. godinu s prva četiri mjeseca 2015. godine.

2.3 PVGIS

PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*) je sredstvo za geografsku procjenu mogućnosti korištenja solarne energije za neko područje. PVGIS pruža popis solarnih energetske resursa i procjenu proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava temeljen na geografskoj karti u Europi, Africi i jugozapadnoj Aziji. PVGIS je dio „SOLAREC“ (*Solar Electricity Action*) projekta koji doprinosi implementaciji obnovljivih izvora energije u Europskoj Uniji kao održivog i dugoročnog izvora energije.[9]



Slika 5. Izgled korisničkog sučelja programa PVGIS

PVGIS prikuplja podatke iz nekoliko stotina meteoroloških mjernih stanica gdje se direktno ili indirektno mjeri dozračena energija od Sunca. Kako bi se iz ovih mjerenja dobile prostorne baze podataka koriste se različite interpolacijske tehnike.

PVGIS raspolaže bazom podataka za sljedeće regije:

1. Europski kontinent
2. Mediteran, Afrika i jugozapadna Azija

2.3.1 Europski kontinent

Baza podataka sadrži tri grupe rasterskih slojeva rezolucije 1 km x 1 km:

1. geografski podaci: digitalni model visine, administrativne granice, gradovi
2. prostorno neprekinuti klimatski podaci:
 - dnevna ozračenost horizontalne plohe,
 - odnos difuznog i globalnog zračenja,
 - optimalni kut nagiba fotonaponskih modula za maksimalno iskorištenje dozračene energije- inklinacija
3. regionalni prosjeci za urbanizirana područja:
 - godišnja suma ozračenosti (horizontalna, vertikalna i površina pod optimalnim kutem)
 - godišnja suma predviđene proizvodnje električne energije (horizontalna, vertikalna i optimalno nagnuta površina)
 - optimalni kut nagiba fotonaponskih modula za maksimalno iskorištenje dozračene energije- inklinacija

2.3.2 Mediteran, Afrika i jugozapadna Azija

Baza podataka sadrži prve dvije grupe rasterskih slojeva kao i za Europski kontinent samo je u ovom slučaju rezolucija 2 km x 2 km.

2.3.3 Korišteni podaci s PVGIS-a

U ovom radu korišteni su podaci o prosječnoj mjesečnoj i prosječnoj dnevnoj proizvodnji električne energije za svaku od analiziranih elektrana. U PVGIS se unosi instalirana snaga elektrane i preko baza podataka o dozračenju energiji dobivaju se podaci o proizvodnji. Također se moraju i unijeti podaci o inklinaciji i azimutu, za koje u PVGIS-u postoji opcija odabera optimalne vrijednosti koje PVGIS sam izračuna. Tako da za svaku elektranu postoje različite vrijednosti inklinacije i azimuta ali one se obično kreću ovisno o lokaciji između 30° i 40° za inklinaciju i 0° za azimut što označava jug.

Na slici 6. prikazani su podaci o prosječnim mjesečnim i prosječnim dnevnim proizvodnjama električne energije za svaki mjesec, te podaci o prosječnoj dozračenju mjesečnoj i dnevnoj energiji za svaki mjesec. Također su i navedeni podaci o optimalnom kutu panela u odnosu na horizontalnu plohu te azimut. Vrijednosti proizvedene električne energije su navedene u kWh, a vrijednosti dozračenju energije u kWh/m².

Latitude: 43°44'6" North,
 Longitude: 15°53'42" East
 Nominal power of the PV system: 30kWp
 Inclination of modules: 36deg.
 Orientation (azimuth) of modules: 0deg.

Fixed angle				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
1	69.80	2160	2.90	89.8
2	98.10	2750	4.12	115
3	132.00	4080	5.67	176
4	140.00	4190	6.17	185
5	149.00	4620	6.71	208
6	150.00	4500	6.91	207
7	158.00	4900	7.38	229
8	151.00	4680	7.07	219
9	134.00	4020	6.08	182
10	109.00	3370	4.78	148
11	71.80	2160	3.05	91.5
12	62.70	1940	2.61	80.8
Year	119.00	3620	5.29	161

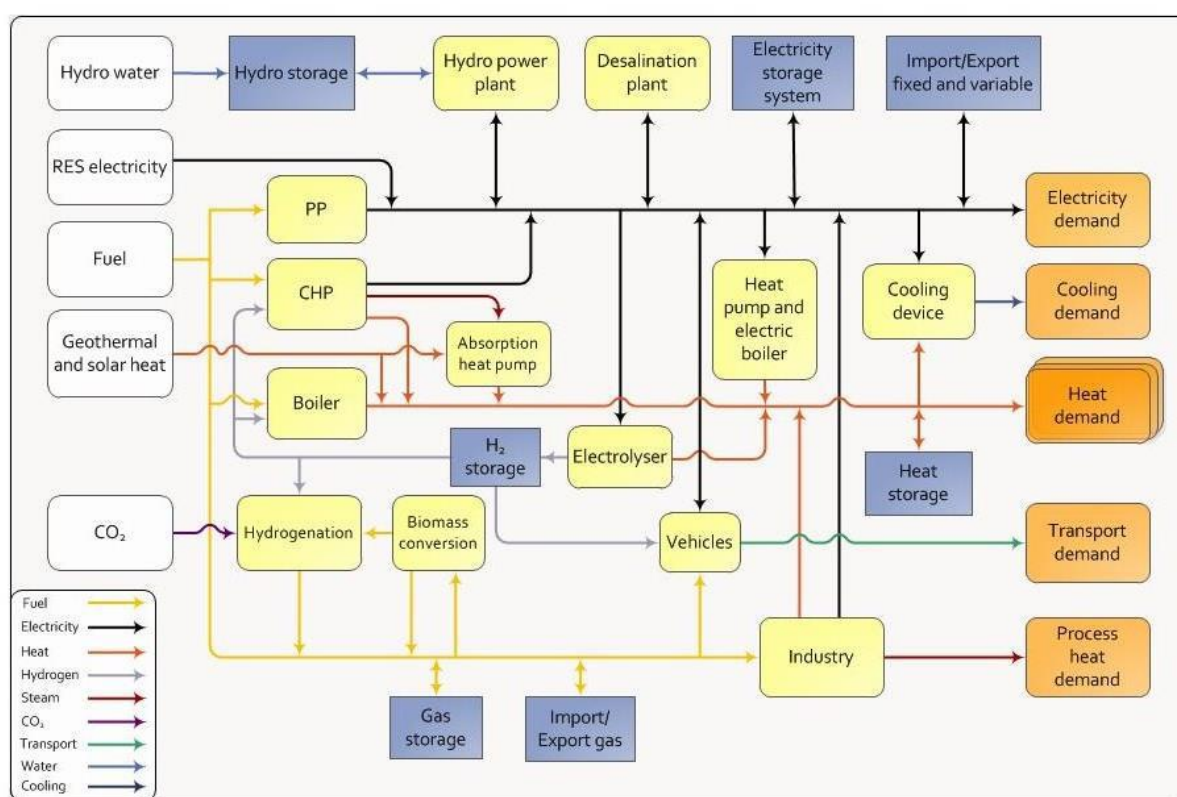
Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)
 Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)
 Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)
 Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

PVGIS (c) European Communities, 2001-2012

Slika 6. Primjer podataka iz PVGIS-a za elektranu FN sustav IZO staklo

2.4 EnergyPlan

Kako bi se usporedili podaci o proizvodnji električne energije te podaci o dozračenoj energiji s dostupnim distribucijama, korišten je program EnergyPlan koji služi za modeliranje regionalnih i nacionalnih energetske sustava. Program je razvijen na Sveučilištu u Aalborgu, u Danskoj, a trenutno je besplatan. Detaljna dokumentacija i mogućnost preuzimanja je dostupna na www.energyplan.eu. EnergyPlan se koristi za različite studije energetske sustava na lokalnoj, nacionalnoj i regionalnoj razini. Njegov ulazno/izlazni model se sastoji od tri sektora: električna energija, toplinska energija i transport, kao što prikazuje slika 7.



Slika 7. Shematski prikaz EnergyPlan programa

3. ANALIZA ULAZNIH PODATAKA

3.1 Mjerenja 14 sunčanih elektrana

Koristeći dobivene podatke o proizvedenoj električnoj energiji u satnoj rezoluciji iz 14 sunčanih elektrana mogu se dobiti krivulje godišnje proizvodnje električne energije za svaku elektranu zasebno i za sve elektrane skupa. Premda se može analizirati rad i proizvodnja svake elektrane posebno, za elektroenergetski sustav važna je slika objedinjenog rada svih elektrana kako bi se dobio što bolji dojam o prednostima i nedostacima pa tako i o mogućim poboljšanjima. Za svaku elektranu je u satnoj rezoluciji analizirana proizvodnja na način da je proizvodnja električne energije u svakom satu u godini podijeljena s maksimalnom satnom proizvodnjom u godini. Tako su dobivene vrijednosti u rasponu od 0 do 1 za svaki sat u godini te za svaku analiziranu elektranu. Na taj način, prilikom analize proizvodnje elektrana, izbjegao se utjecaj nazivne instalirane snage svake pojedine elektrane pošto instalirane snage za 14 analiziranih sustava variraju od 7,28 kW do 300 kW. Te vrijednosti su sumirane za svaki sat u godini posebno, za sve elektrane, te je dobivena krivulja proizvodnje za sve elektrane u rasponu od 0 do 14. Ova krivulja je kasnije uspoređivana s potrošnjom električne energije u RH i dostupnom energijom iz baza Meteonorma.

Jednadžba 1.

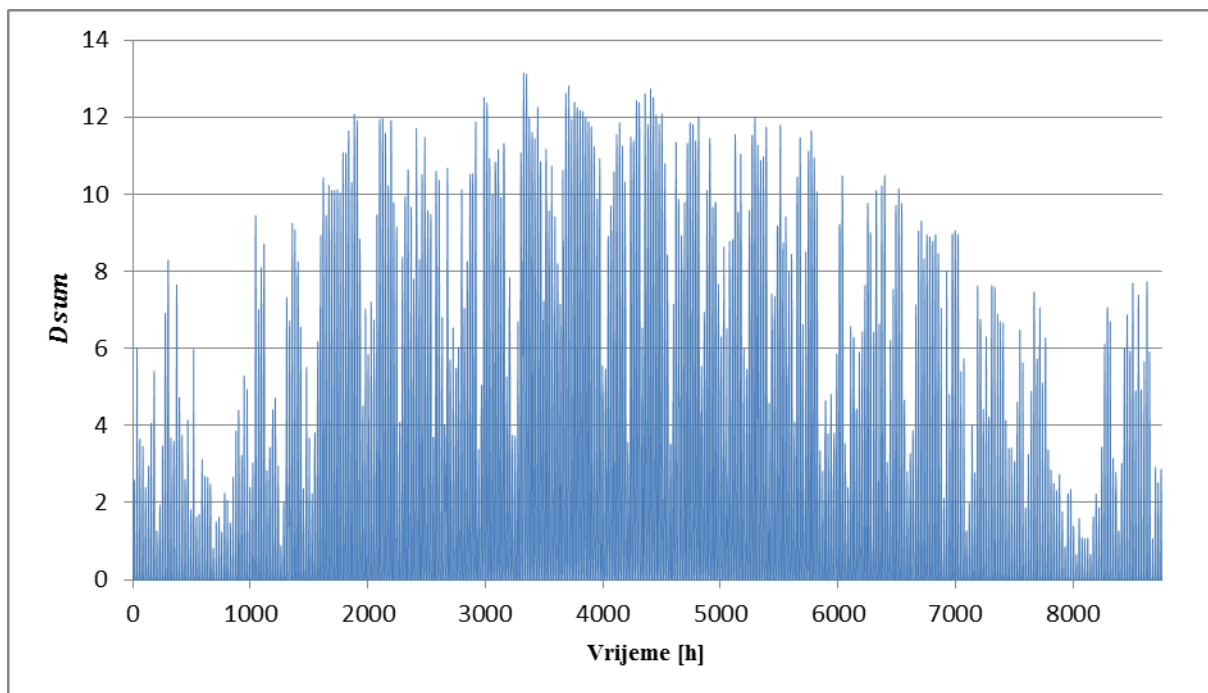
$$D_{k,PV,h} = \frac{D_{PV,h}}{D_{PV,h,max}}$$

U gornjoj formuli $D_{k,PV,h}$ označava kvocijent proizvedene električne energije u pojedinom satu ($D_{PV,h}$) i maksimalne proizvedene električne energije u godini ($D_{PV,h,max}$) za pojedinu elektranu iz mjerenih podataka. Indeks h označava sat u godini, a indeks PV označava pojedinu analiziranu sunčanu elektranu. Iz toga proizlazi da se vrijednost h kreće u rasponu od 1 do 8760, a vrijednost PV u rasponu od 1 do 14.

Jednadžba 2.

$$D_{sum} = \sum_{PV=1}^{14} D_{k,PV,h}$$

D_{sum} označava sumu $D_{k,PV,h}$ vrijednosti za svih 14 elektrana kako je prikazano u jednadžbi 1. Bezdimenzijske je vrijednosti i kreće se u rasponu od 1 do 14 za svaki sat u godini.



Slika 8. Mjerenja 14 sustava

Na slici 8. prikazana je zbirna satna krivulja proizvodnje električne energije proračunata iz mjerenih podataka za sve analizirane sustave opisane u poglavlju 3.1.

3.2 Meteonorm za 14 sustava

Koristeći dobivene podatke iz Meteonorma težilo se k dobivanju krivulje dozračene energije koja bi se mogla usporediti s krivuljom proizvodnje električne energije opisane u poglavlju 3.1. To se postiglo prikupljanjem podataka o dozračenoj energiji unoseći lokacije elektrana u Meteonorm te dobivanju podataka i krivulja o dozračenoj energiji za svaku pojedinu elektranu u satnoj rezoluciji. Podaci o dozračenoj energiji za svaki sat u godini podijeljeni su s maksimumom dozračene energije u satu za svaku lokaciju posebno i zatim su zbrojeni za svaku elektranu po satu. Tako se došlo do krivulje u rasponu od 0 do 14 primjenjivanjem istog postupka kao i kod mjerenih podataka o proizvodnji električne energije.

Jednadžba 3.

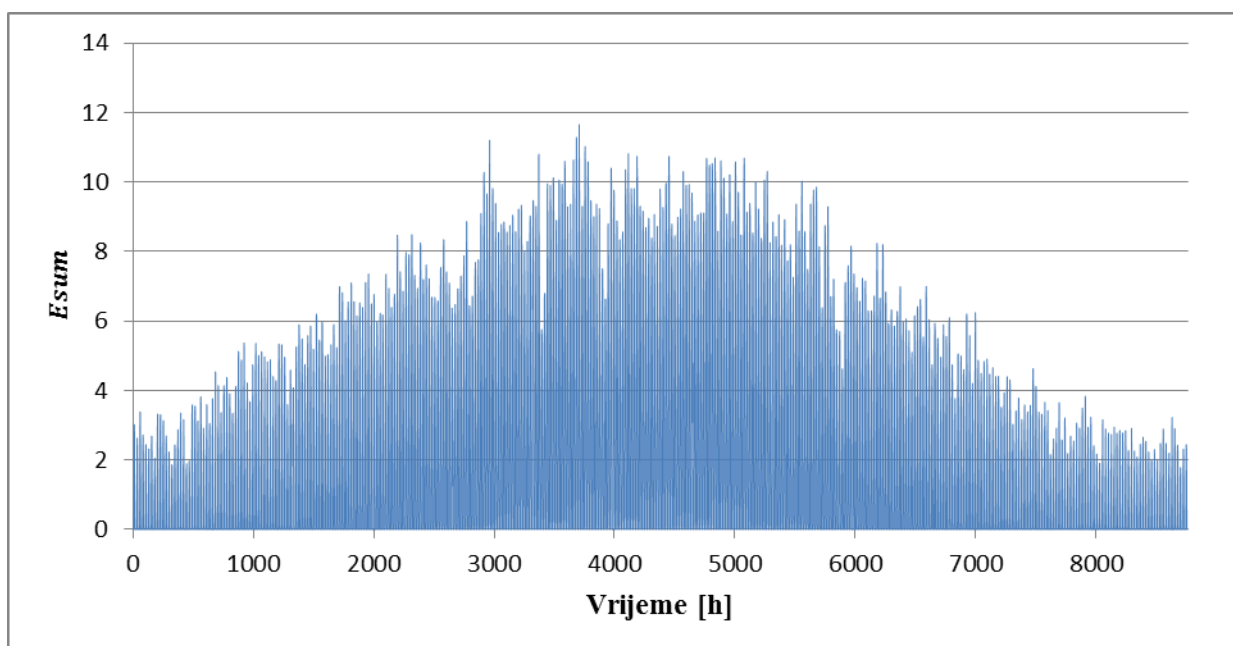
$$E_{k,PV,h} = \frac{E_{PV,h}}{E_{PV,h,max}}$$

U gornjoj jednadžbi $E_{k,PV,h}$ označava kvocijent dozračene energije u pojedinom satu i maksimalne satne dozračene energije u godini za pojedinu elektranu iz baza Meteonorma. Indeks h označava sat u godini, a indeks PV označava pojedinu analiziranu sunčanu elektranu. Isto kao i u slučaju jednadžbe 1. vrijednost h kreće se u rasponu od 1 do 8760, a vrijednost PV u rasponu od 1 do 14.

Jednadžba 4.

$$E_{sum} = \sum_{PV=1}^{14} E_{k,PV,h}$$

E_{sum} označava sumu $E_{PV,h,k}$ vrijednosti za svih 14 elektrana kako je prikazano u jednadžbi 3. Bezdimenzijske je vrijednosti i kreće se u rasponu od 1 do 14 za svaki sat u godini.



Slika 9. Prikaz satne distribucije dozračene energije na horizontalnu plohu za 14 sustava iz baza Meteonorma

3.3 PVGIS za 14 sustava

Analiza podataka iz PVGIS-a uzima u obzir podatke o prosječnoj mjesečnoj i prosječnoj dnevnoj proizvodnji električne energije za pojedini mjesec ili podatke o dozračenoj energiji za navedena razdoblja. U radu su korišteni podaci o proizvedenoj električnoj energiji koje

PVGIS daje u kWh izračunavajući uz to i optimalni kut nagiba panela u odnosu na horizontalnu plohu (inklinacija) te optimalni azimut. Mjesečni podaci o proizvodnji iz PVGIS-a pokazali su da je proizvodnja najveća za sve elektrane u mjesecu srpnju te se iz toga daje zaključiti da je mjesec srpanj referentni pokazatelj rada i iskoristivosti elektrane za ostatak godine. Stoga su svi mjesečni podaci o proizvodnji podijeljeni s maksimalnom mjesečnom proizvodnjom, odnosno proizvodnjom u mjesecu srpnju. Ti podaci su zatim zbrojeni za sve elektrane i dobiven je uvid rada svih analiziranih sunčanih elektrana u jednoj godini po PVGIS-u kako je vidljivo na slici 10.

Jednadžba 5.

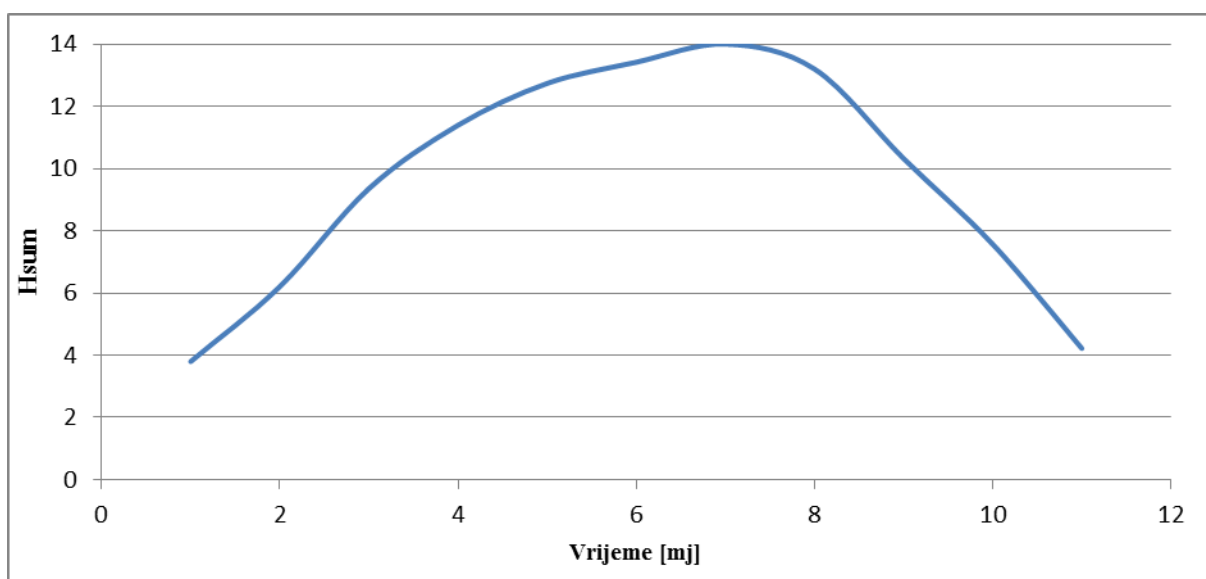
$$H_{k,PV,m} = \frac{H_{PV,m}}{H_{PV,m,max}}$$

U gornjoj formuli $H_{PV,m,k}$ označava kvocijent proizvedene električne energije u pojedinom mjesecu i maksimalne proizvedene električne energije u jednom mjesecu u godini za pojedinu elektranu iz podataka PVGIS-a. Indeks m označava mjesec u godini, a PV označava pojedinu sunčanu elektranu. Vrijednost m kreće se u rasponu od 1 do 12, a vrijednost PV u rasponu od 1 do 14.

Jednadžba 6.

$$H_{sum} = \sum_{PV=1}^{14} H_{k,PV,m}$$

H_{sum} označava sumu $H_{PV,h,k}$ vrijednosti za svih 14 elektrana kako je prikazano u jednadžbi 5. Bezdimenzijske je vrijednosti i kreće se u rasponu od 1 do 14 za svaki mjesec u godini.

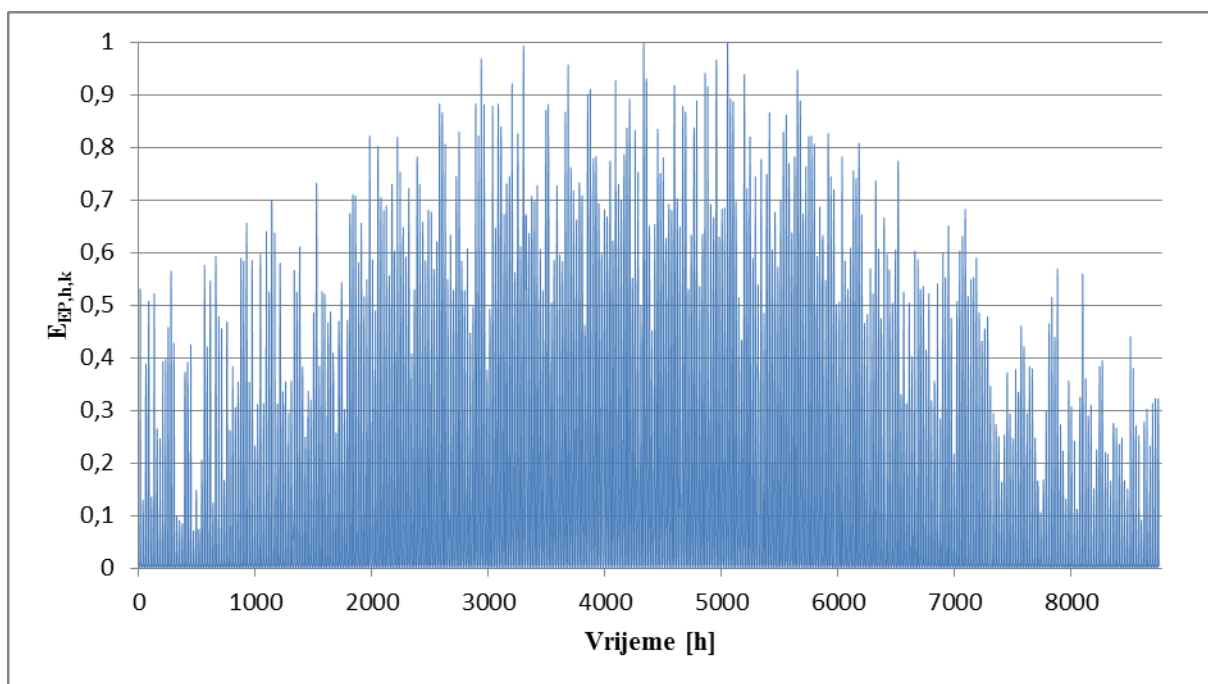


Slika 10. Krivulja mjesečne proizvodnje električne energije za 14 sustava po PVGIS-u

Na slici 10. vidljivo je da je da analizirane elektrane najveći utjecaj imaju u ljetnim mjesecima jer im je tada proizvodnja najveća. U zimskom razdoblju proizvodnja pada i do trećine vrijednosti koja se ostvaruje u ljetnom razdoblju. Ovo možemo zaključiti na temelju svih izvora usporedbe: mjerenih podataka, Meteonorm i PVGIS-a.

3.4 EnergyPlan distribucija fotonaponskih sustava

Krivulje o proizvedenoj električnoj energiji odnosno o dozačenoj energiji u satnoj distribuciji uspoređuju se s distribucijama za fotonaponske sustave dostupne u EnergyPlan programu. Za tu usporedbu korištena je distribucija za fotonaponske sustave iz EnergyPlana iz 2014. godine za Republiku Hrvatsku. Ova krivulja je uzeta iz završnog rada „Analiza utjecaja izgradnje vjetroelektrana i fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske“ autora Ivana Komušanca. Distribucija se sastoji od 8 784 vrijednosti u obliku tekstualne datoteke, odnosno daje podatke o distribuciji električne energije u satnoj rezoluciji za određenu godinu.[10]



Slika 11. Distribucija iz EnergyPlana za 2014. godinu za Republiku Hrvatsku

EnergyPlan distribucija za sunčane elektrane također je svedena na bezdimenzijske vrijednosti od 0 do 1 prema jednadžbi 7.

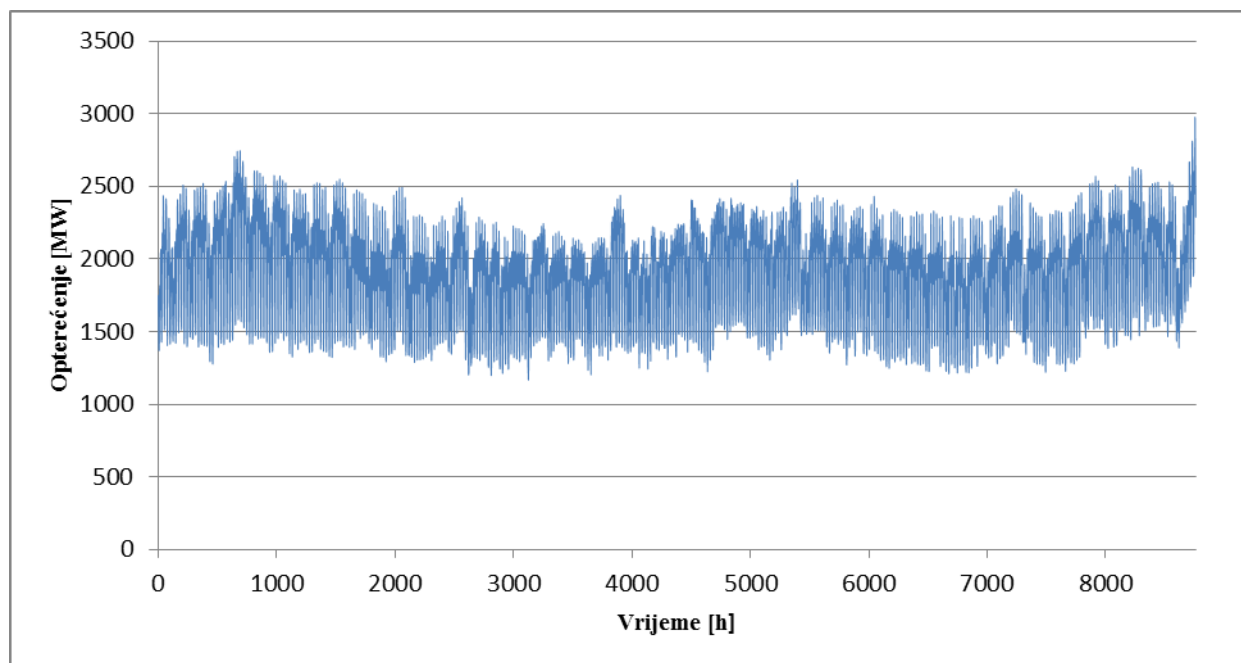
Jednadžba 7.

$$E_{k,EP,h} = \frac{E_{EP,h}}{E_{EP,h,max}}$$

$E_{EP,h}$ označava satne vrijednosti distribucije za fotonaponske sustave, a $E_{EP,h,max}$ maksimalne satne vrijednosti distribucije u godini. Zaključujući po gore prikazanoj jednadžbi, $E_{k,EP,h}$ označava kvocijent ovih dviju navedenih vrijednosti, bezdimenzijske je vrijednosti i kreće se u rasponu između 0 i 1.

3.5 Potrošnja električne energije u RH za 2014. godinu

U sektoru električne energije, ukupna potrošnja električne energije hrvatskog elektroenergetskog sustava u 2014. godini iznosila je 16,9 TWh, što predstavlja pad od 2,6 % u odnosu na 2013. godinu i nastavak petogodišnjeg trenda pada ukupne potrošnje električne energije u Republici Hrvatskoj. Elektrane na teritoriju Republike Hrvatske u 2014. godini proizvele su ukupno 12,2 TWh električne energije kojom je podmireno 72% domaćih potreba. Povoljna je okolnost da je u hidroelektranama proizvedeno 8,4 TWh električne energije, najviše u zadnjih 10 godina, što je približno 69 % ukupno proizvedene električne energije na teritoriju Republike Hrvatske u 2014. godini. Ostatak domaćih potreba (28%) pokriven je uvozom, pri čemu je 3,0 TWh (15% ukupnih potreba) podmireno proizvodnjom električne energije u Nuklearnoj elektrani Krško. U ukupnoj potrošnji električne energije u Republici Hrvatskoj, udio električne energije proizvedene u proizvodnim postrojenjima koja koriste obnovljive izvore i kogeneracije, a koji su uključeni u sustav poticanja iznosio je 5,51%.[11]



Slika 12. Potrošnja električne energije u 2014. za RH

Slika 12. daje uvid u satnu potrošnju električne energije u Republici Hrvatskoj za 2014. godinu. Pošto je izvedena na godišnjoj bazi, slika 12. pokazuje kako vremensko razdoblje utječe na potrošnju električne energije. Razlog rasta opterećenja ljeti na 2 500 MW je uzrokovano priljevom turista, koji sami time povećavaju broj ljudi koji troše električnu energiju, a drugi razlog je korištenje uređaja za hlađenje koji se pokreću na električnu energiju. Razlog potrošnje zimi je korištenje uređaja za grijanje koji troše veliku količinu energije pa je u jednom trenutku na kraju godine opterećenje poraslo na gotovo 3 000 MW.

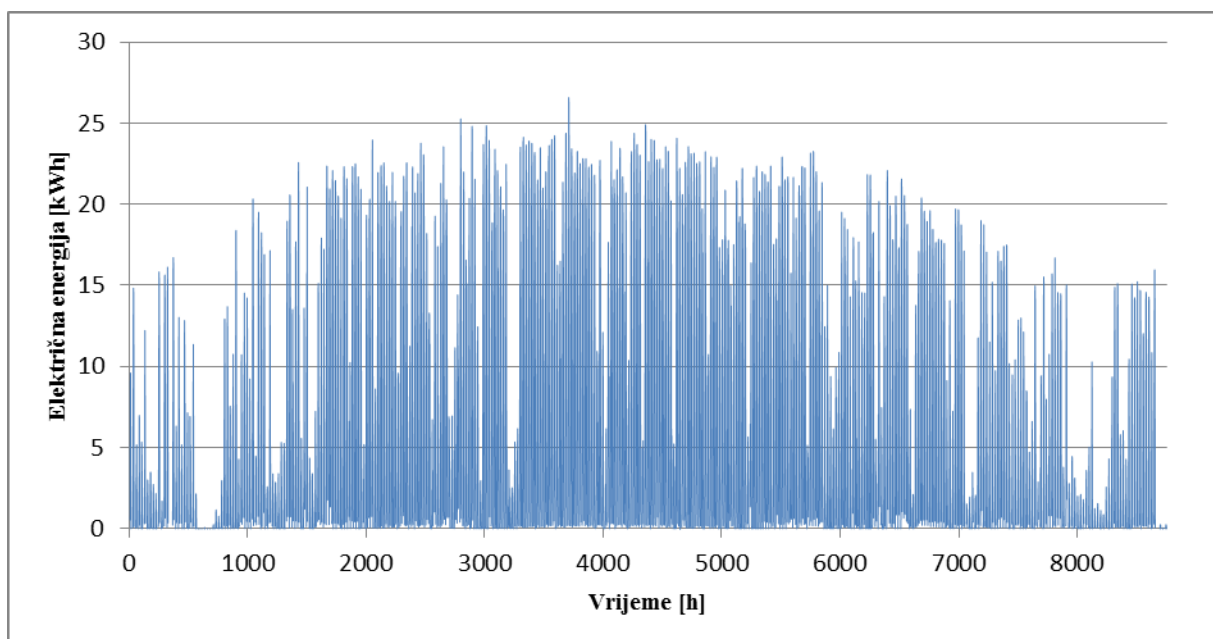
4. REZULTATI

4.1 Analiza proizvodnje električne energije iz sunčanih elektrana

Nakon prikupljenih podataka o proizvodnji električne energije iz 14 sunčanih elektrana smještenih na području Republike Hrvatske analiziraju se mjereni podaci o proizvodnji te uspoređuju s podacima iz Meteonorma i PVGIS-a.

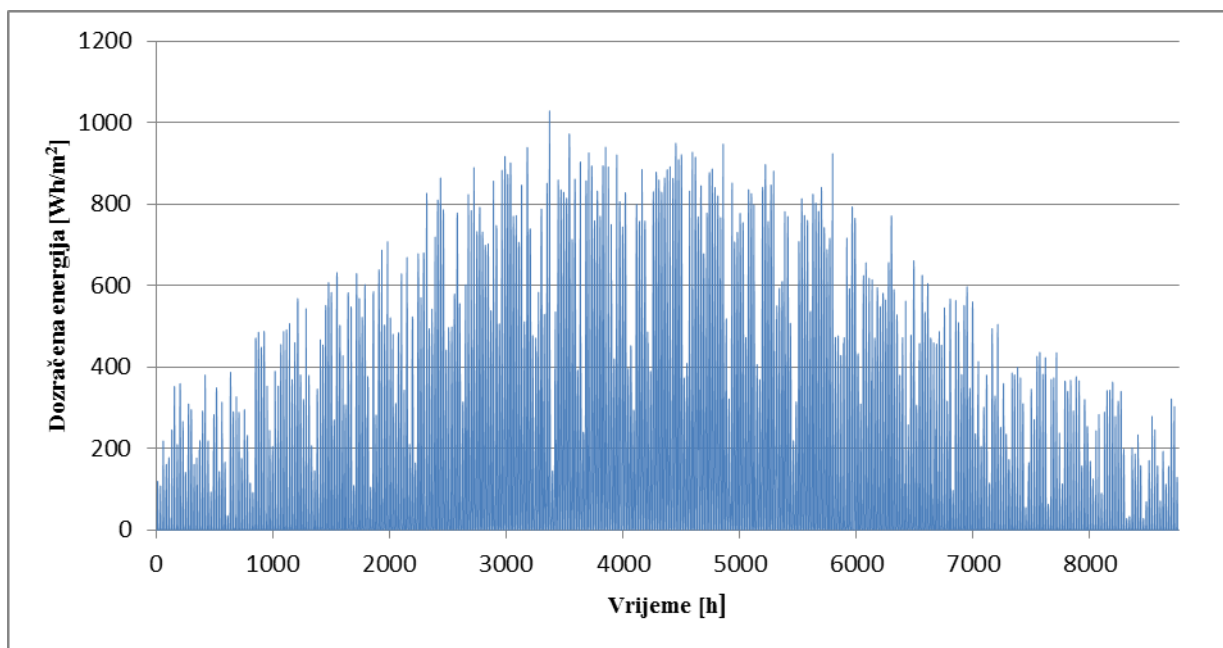
4.1.1 Analiza rada i proizvodnje sunčane elektrane INES

Sunčana elektrana INES smještena je na području grada Vinkovaca i puštena je u pogon u travnju 2015. godine. Instalirana snaga ove elektrane je 30 kW i proizvedena električna energija za 2014. godinu iznosi 35 381,1 kWh. Na slici 13. prikazana je proizvodnja za 2014. godinu u satnoj rezoluciji. Vidi se da je najveća proizvodnja u ljetnim mjesecima, što je naravno i za očekivati, ali se redovno kroz cijelu godinu, osim u zimskom razdoblju, postižu vrijednosti pri kojima elektrana u jednom satu proizvede i više od 20 kWh električne energije. I ovdje se mora napomenuti da su ove smanjene vrijednosti koje se daju uočiti oko 600. sata u godini i 8 000. sata u godini posljedica prekida sustava za praćenje o proizvodnji energije tako da je navedena proizvedena energija od 35 381,1 kWh i veća, a to će se procijeniti kad se usporede ti podaci s podacima iz drugih izvora.



Slika 13. Proizvodnja električne energije sunčane elektrane INES za 2014. godinu

Da se stekne šira slika o mogućnostima ove elektrane, uspoređuje se dozračena energija iz baza Meteonorma, proizvedena električna energija po PVGIS-u i mjerene vrijednosti o proizvodnji.



Slika 14. Dozračena energija na horizontalnu plohu za elektranu INES iz baza Meteonorma

Na slici 14. prikazana je godišnja raspodjela dozračene energije za lokaciju elektrane INES u Vinkovcima. Podaci su izraženi u Wh/m^2 . Vidi se da je najveća dozračena energija u ljetnom razdoblju kad sunčane elektrane i proizvode najviše električne energije. Da bi se ova dva izvora mogla usporediti potrebno je poznavati faktor iskoristivosti sunčane elektrane η i površinu panela elektrane $A [\text{m}^2]$. Ti podaci nisu bili dostupni tako da se izračunao umnožak faktora iskoristivosti i površine preko podataka o dozračenosti i proizvedenoj energiji iz baza PVGIS-a. Proizvedena dnevna električna energija jednaka je:

Jednadžba 8.

$$E_m = H_m * A * \eta$$

gdje je E_m proizvedena mjesečna električna energija [kWh], a H_m mjesečna dozračena energija [kWh/m^2].

Podaci o proizvedenoj električnoj energiji i dozračenju energiji dani su u tablici 2.

Tablica 2. PVGIS podaci za sunčanu elektranu INES

Mjesec	Ed	Em	Hd	Hm	A*η
1	41,4	1280	1,68	51,9	24,7
2	62,8	1760	2,58	72,1	24,4
3	104	3230	4,46	138	23,4
4	122	3660	5,39	162	22,6
5	127	3950	5,75	178	22,2
6	133	3980	6,09	183	21,7
7	138	4260	6,37	197	21,6
8	134	4170	6,22	193	21,6
9	108	3240	4,82	145	22,3
10	88,8	2750	3,84	119	23,1
11	56	1680	2,33	69,8	24,1
12	33,1	1030	1,33	41,3	24,9
Prosjek	95,9	2920	4,25	129	23,1

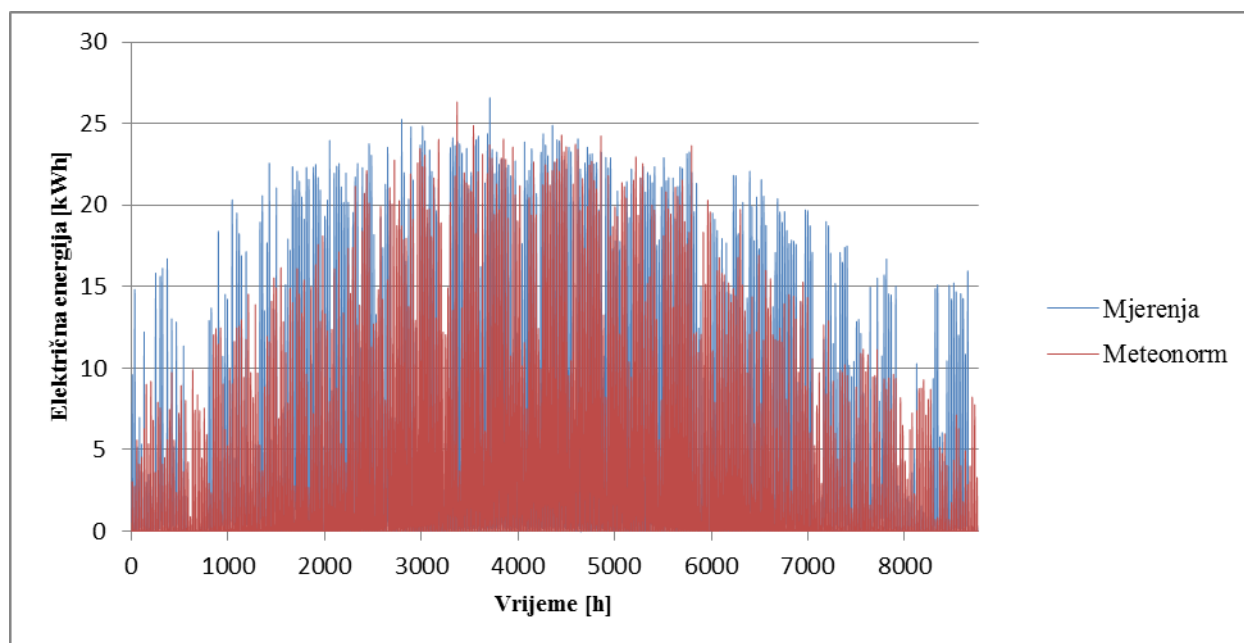
E_d [kWh] označava dnevnu proizvodnju električne energije, a H_d [kWh] označava dozračenu energiju u jednom danu.

S poznatim umnoškom površine i faktora iskoristivosti elektrane iz jednadžbe 8. moguće je podatke iz Meteonorma dane u Wh/m^2 pretvoriti u kWh i usporediti ih s mjerenim podacima o proizvodnji. Takav primjer pokazan je u tablici 3.

Tablica 3. Prikaz primjera pretvorbe podataka iz Meteonorma u kWh

Meteonorm [Wh/m ²]	Meteonorm [kWh/m ²]	Meteonorm [kWh]
1	0,001	0,0231
9	0,009	0,2079
141	0,141	3,2571
193	0,193	4,4583
217	0,217	5,0127
150	0,15	3,465
145	0,145	3,3495
82	0,082	1,8942
31	0,031	0,7161

Kad se pretvore podaci dozračenj energiji iz Meteonorma u kWh moguće ih je usporediti s podacima o proizvedenoj električnoj energiji.

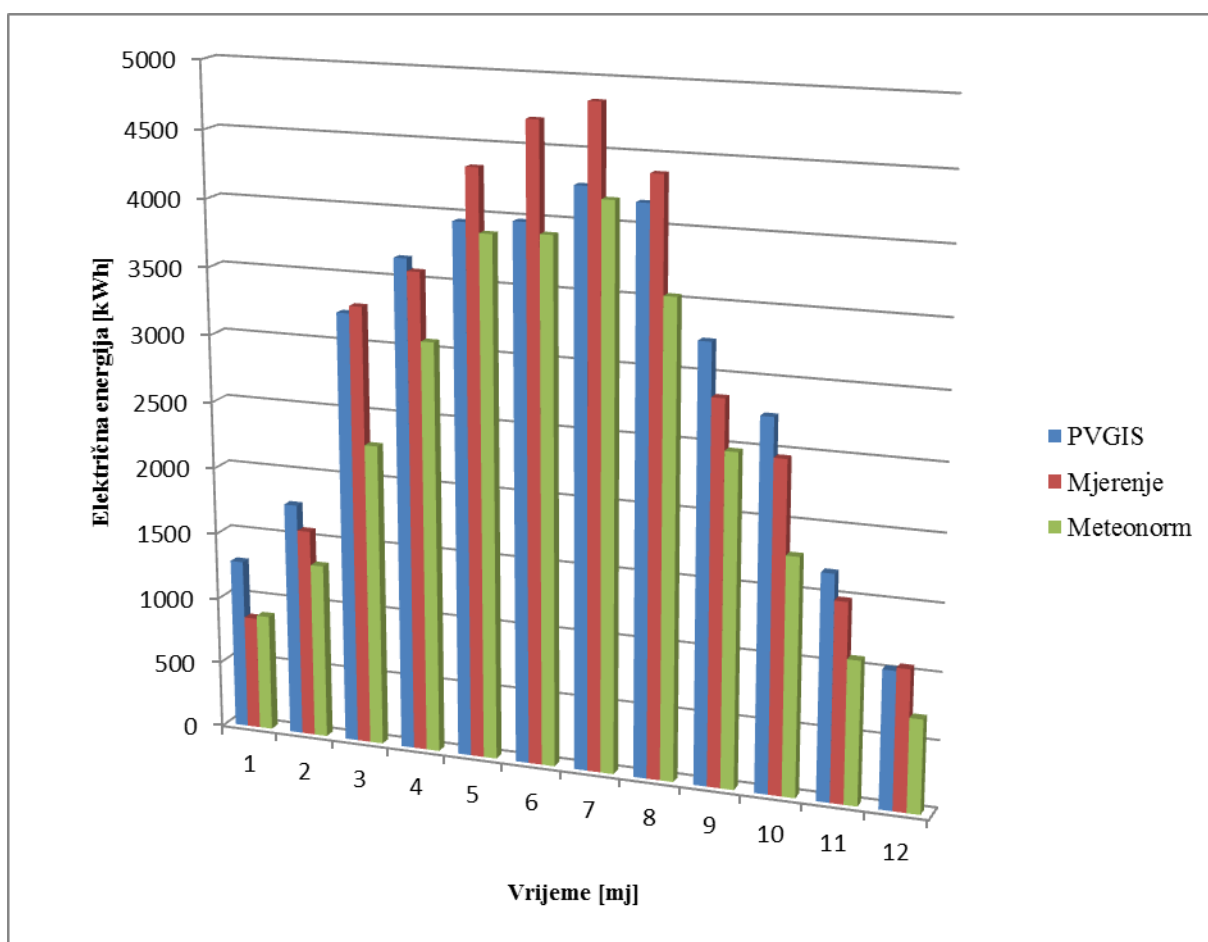


Slika 15. Usporedba podataka o proizvodnji električne energije iz mjerenih izvora i Meteonorma za sunčanu elektranu INES

Na slici 15. vidi se da se ljetni mjeseci uspoređujući navedena dva izvora podataka prilično poklapaju što nije slučaj s ostatkom godine. Treba napomenuti da su podaci o dozračenj energiji iz Meteonorma za 2005. godinu a mjereni podaci o proizvodnji sunčane elektrane INES za 2014. godinu. Ova razlika se može i objasniti pretvaranjem podataka iz

Meteonorma o dozačenoj energiji u proizvedenu električnu energiju koristeći umnožak površine i faktora iskoristivosti ($A \cdot \eta$) koji za ovu elektranu iznosi 23,1 kao što je pokazano u tablici 2. Podaci o umnošku površine i faktora iskoristivosti dobiveni su koristeći podatke s PVGIS-a što može biti još jedan razlog odstupanja.

Pošto su podaci o mjerenju proizvodnje električne energije i podaci o dozačenoj energiji dani u satnoj rezoluciji nije ih moguće usporediti s podacima iz PVGIS-a koristeći satnu rezoluciju jer je korištena samo mjesečna rezolucija iz PVGIS-a. Tako da se sva tri izvora mogu usporediti samo u mjesečnoj rezoluciji kako je to napravljeno na grafikonu 11.



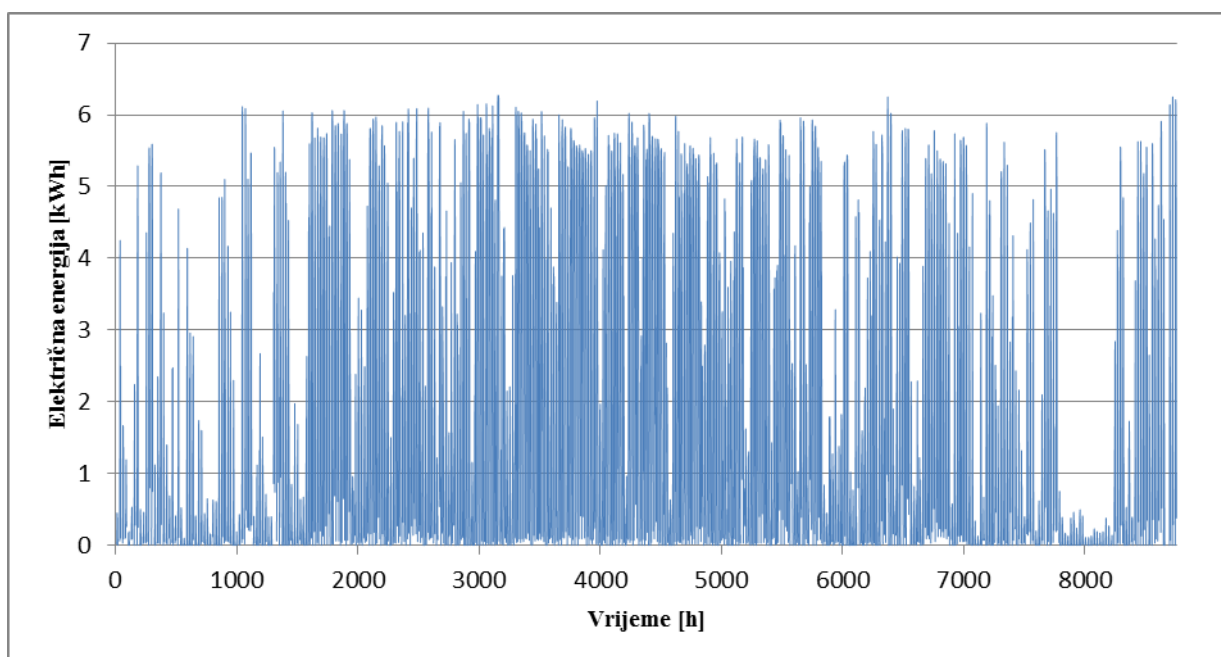
Slika 16. Mjesečna usporedba proizvodnje električne energije iz mjerenih podataka, Meteonorma i PVGIS-a sunčane elektrane INES

Na slici 16. može se vidjeti kako mjesečne proizvodnje električne energije sunčane elektrane INES dobivene iz Meteonorma i preuzete s PVGIS-a ne odudaraju jedna od druge, dok se to ne može reći za mjerene podatke. Mjerene vrijednosti u ljetnim mjesecima su uvjerljivo

najveće što se može pripisati većem broju sunčanih sati 2014. godine iz koje su podaci nego 2005. iz koje su podaci od Meteonorma. PVGIS uzima u obzir srednje vrijednosti kroz razdoblje od par godina pa su stoga razlike u vrijednostima podataka preuzetih s PVGIS-a i mjerenih podataka manje. Podaci s PVGIS-a ipak pokazuju odstupanje u hladnijim mjesecima što se može i pripisati geografskom karakteru područja na kojem je instalirana sunčana elektrana INES. Vrijednosti odstupanja prikazane su u poglavlju 4.2.

4.1.2 Analiza rada i proizvodnje sunčane elektrane Solarni stup Špansko

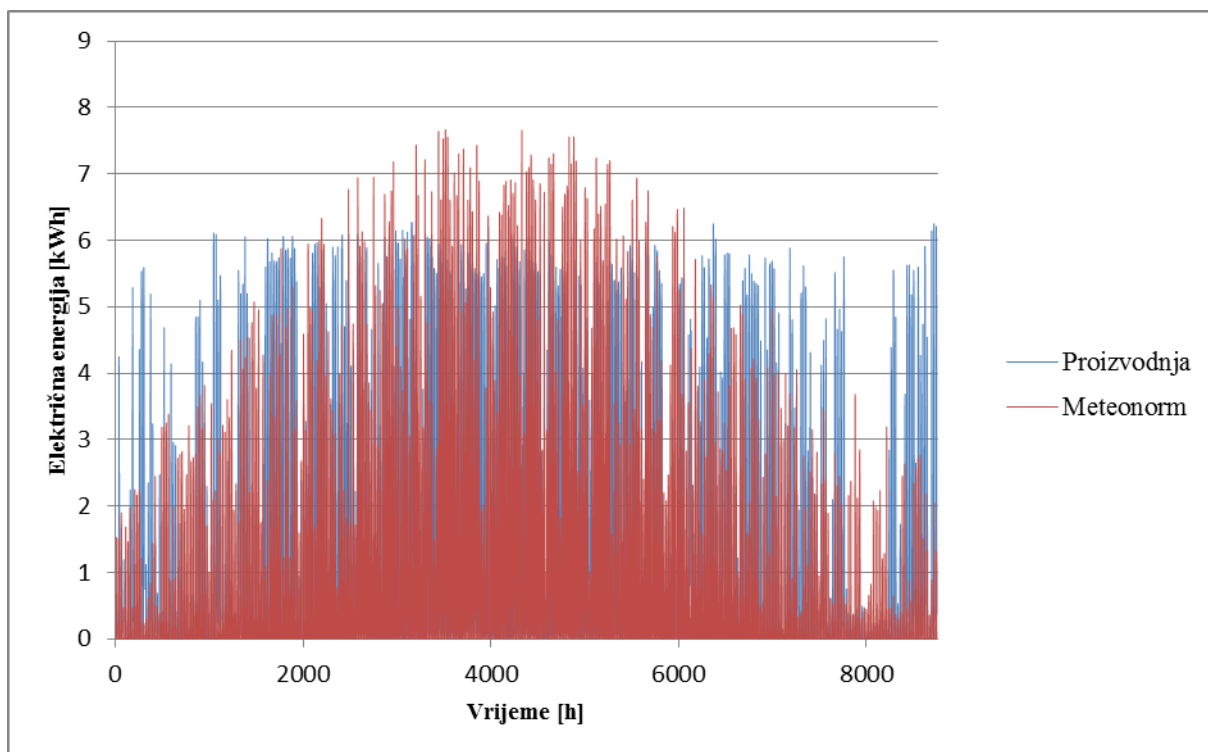
Sunčana elektrana Solarni stup Špansko smještena je na području gradske četvrti Špansko u gradu Zagrebu. Instalirana snaga ove elektrane je 7,28 kW. Posebnost ove sunčane elektrane jest da je to jedina elektrana od analiziranih koja je dvoosna, odnosno s dvoosnim praćenjem Sunca. Sunčana elektrana s dvoosnim praćenjem sastoji se od solarnih panela čija se površina zakreće oko dvije osi omogućujući tako postizanje optimalne inklinacije i optimalnog azimuta kroz cijeli dan. Takva elektrana ima veću korisnost od uobičajene elektrane s fiksnim panelima.[12]



Slika 17. Proizvodnja električne energije sunčane elektrane Solarni stup Špansko za 2014. godinu

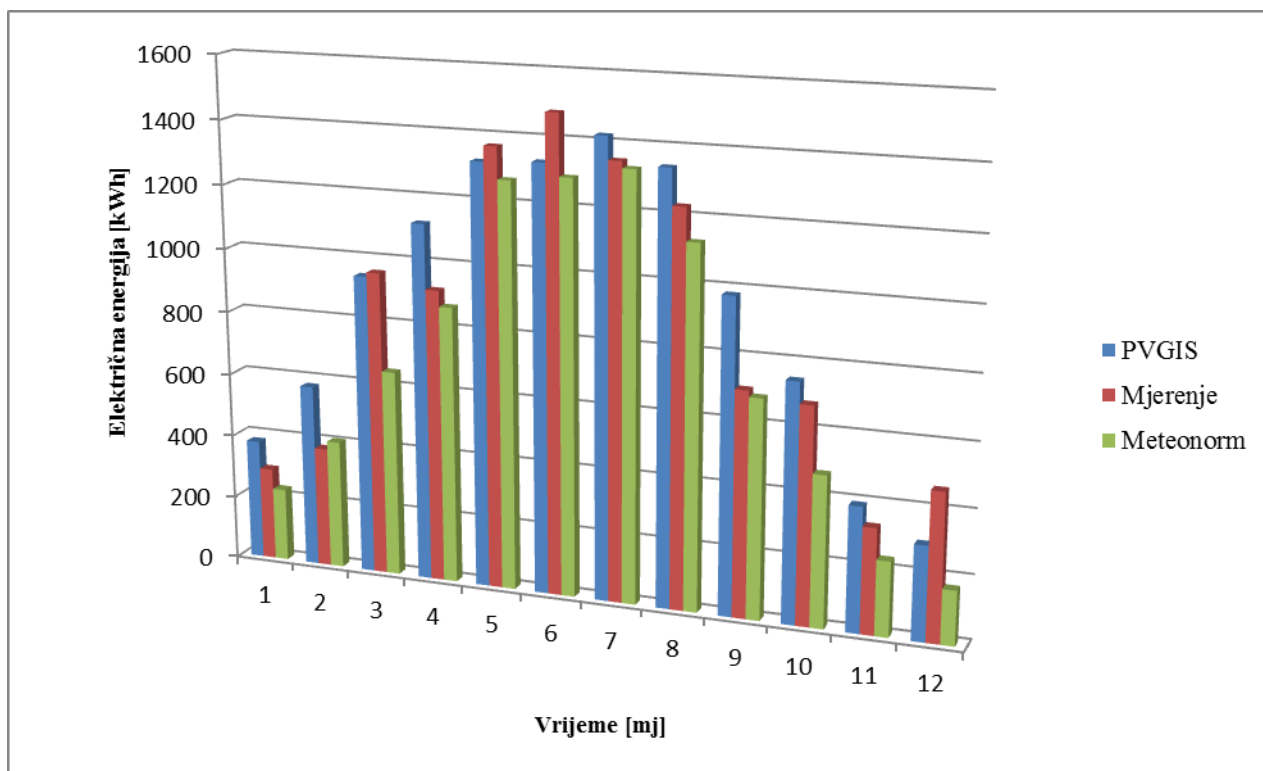
Na slici 17. prikazana je proizvedena električna energija sunčane elektrane Solarni stup Špansko za 2014. godinu i odmah se primjećuje razlika u odnosu na elektranu INES i sliku

13., a to je da se maksimalne satne vrijednosti proizvodnje električne energije ostvaruju kroz cijelu godinu. Takav rad elektrane posljedica je da je dvoosnog praćenja i prilagodbi manjem kutu inklinacije u zimskom razdoblju, odnosno većem kutu inklinacije u ljetnom razdoblju.



Slika 18. Usporedba podataka o proizvodnji električne energije iz mjerenih izvora i Meteonorma za sunčanu elektranu Solarni stup Špansko

Na slici 18. vidi se raspodjela zračenja kroz godinu iz baza Meteonorma i proizvodnja elektrane Solarni stup Špansko i primjećuje se da su podaci o proizvodnji veći kroz zimsko razdoblje a to je zato jer jer Meteonorm daje podatke o dozračenoj energiji na horizontalnu plohu a tijekom zimskog razdoblja inklinacija Sunca je niska i korisnost dvoosne elektrane dolazi posebno do izražaja. PVGIS daje mogućnost izračuna podataka o proizvedenoj električnoj energiji za dvoosne elektrane tako da će najbolja usporedba rada biti iz podataka PVGIS-a i mjerenih podataka o proizvodnji kako je prikazano na slici 19.

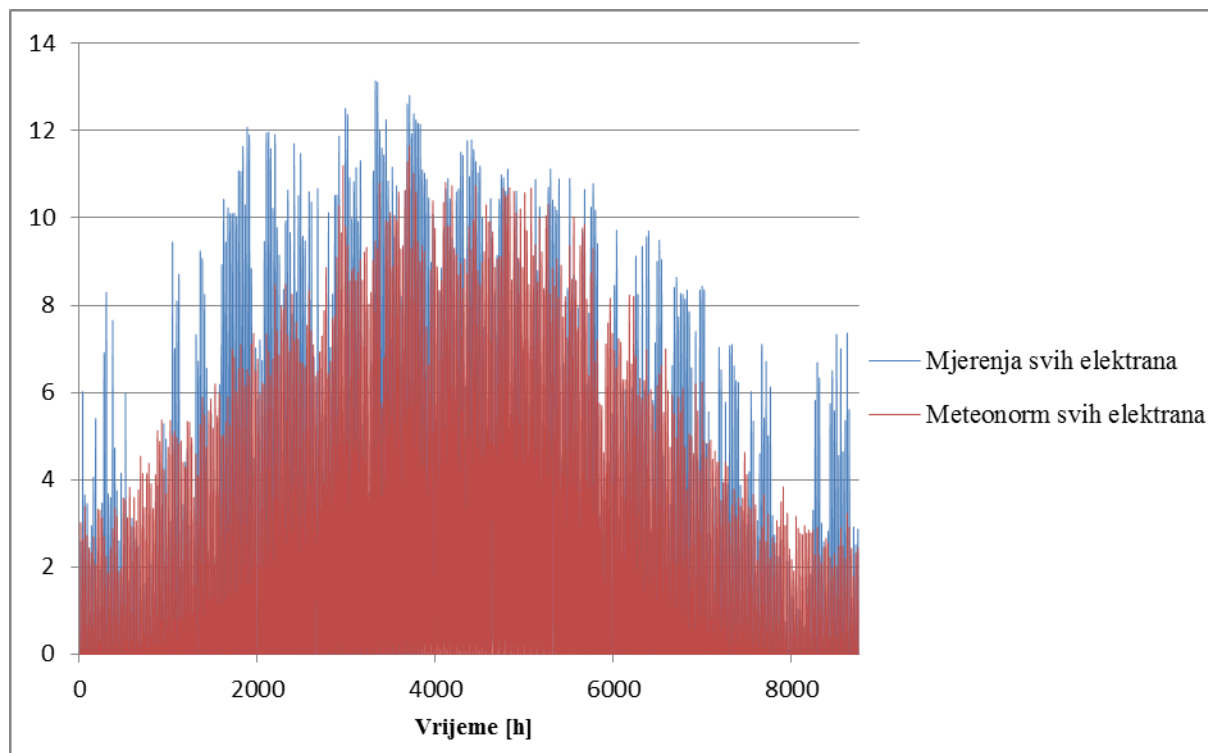


Slika 19. Mjesečna usporedba proizvodnje električne energije iz mjerenih podataka, Meteonorma i PVGIS-a sunčane elektrane Solarni stup Špansko

Na slici 19. primjećuje se da su podaci o proizvodnji preuzeti s PVGIS-a najviši u ljetnom i jesenskom razdoblju kao i na slici 16. Podaci o proizvodnji s Meteonorma su u cijeloj godini najniži, ali to ovisi o broju sunčanih sati.

4.2 Ukupna analiza rada sunčanih elektrana

Cjelokupni postupak analize proizvodnje iz tri izvora sunčane elektrane INES i Solarni stup Špansko može se primijeniti na svaku elektranu zasebno ili na sve elektrane u cjelini. Postupak za primjenu na elektranu posebno prikazan je u poglavljima 4.1.1 i 4.1.2. Ovaj postupak napravljen je za sve analizirane elektrane navedene u poglavlju 1.3 i moguće je prikazati njihove zajedničke karakteristike o proizvodnji električne energije te usporedbu tih podataka s podacima iz baza Meteonorma i PVGIS-a.



Slika 20. Prikaz usporedbe podataka o relativnoj proizvodnji električne energije iz mjerenih izvora i podataka o relativnoj dozačenoj energiji iz baza Meteonorma u bezdimenzijskom obliku

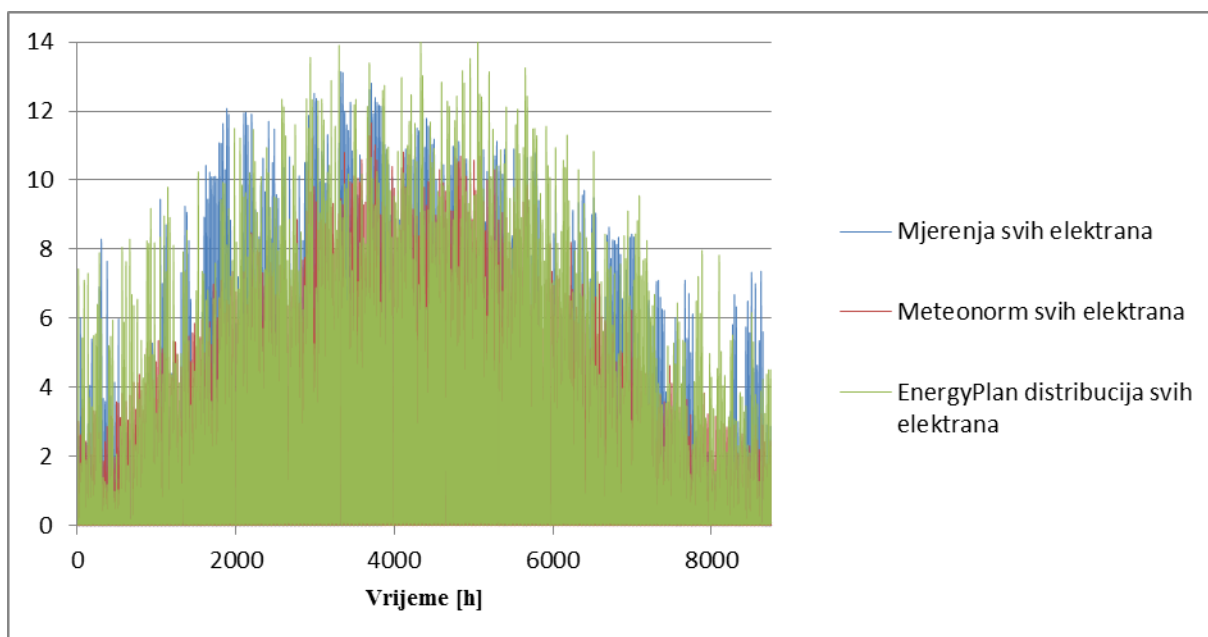
Podaci prikazani na slici 20. dobiveni su prema jednadžbama danim u poglavljima 3.1 i 3.2. Podaci o proizvodnji i podaci o dozačenoj energiji iz baza Meteonorma za svaku su elektranu svedeni na vrijednosti od 0 do 1 i sumirani za sve elektrane. Podaci o proizvodnji su za 2014., a podaci iz Meteonorma za 2005. godinu. Ovdje nije prikazana iskoristivost elektrana jer su i mjerenja i podaci iz Meteonorma dani u bezdimenzijskim vrijednostima. Prikazana je raspodjela dozačene energije s raspodjelom proizvodnje elektrana. Kad se ove vrijednosti prikažu s distribucijom za solarne elektrane iz EnergyPlana dobije se slika 21. Na slici 21. uočava se razlika između distribucije iz EnergyPlana za sunčane elektrane za Republiku Hrvatsku i krivulje stvarne proizvodnje 14 analiziranih sustava. Distribucija iz EnergyPlana je također svedena na bezdimenzijsku vrijednost i prikazana za 14 elektrana prema jednadžbi 9. $E_{EP,h}$ je bezdimenzijska vrijednost tako da je i E_{EP} također bezdimenzijska vrijednost svedena na raspon od 0 do 14. Dobivena je množenjem vrijednosti $E_{EP,h}$ s 14 tako da bi se mogla

usporediti s krivuljama o mjerenju električne energije te s krivuljom o dozračenoj energiji iz baza Meteororma.

Razlog razlike u ovim krivuljama može se naći u nepotpunom prikazu mjerenih podataka te utjecaja neanaliziranih sunčanih elektrana koje su uključene u distribuciju iz EnergyPlana.

Jednadžba 9.

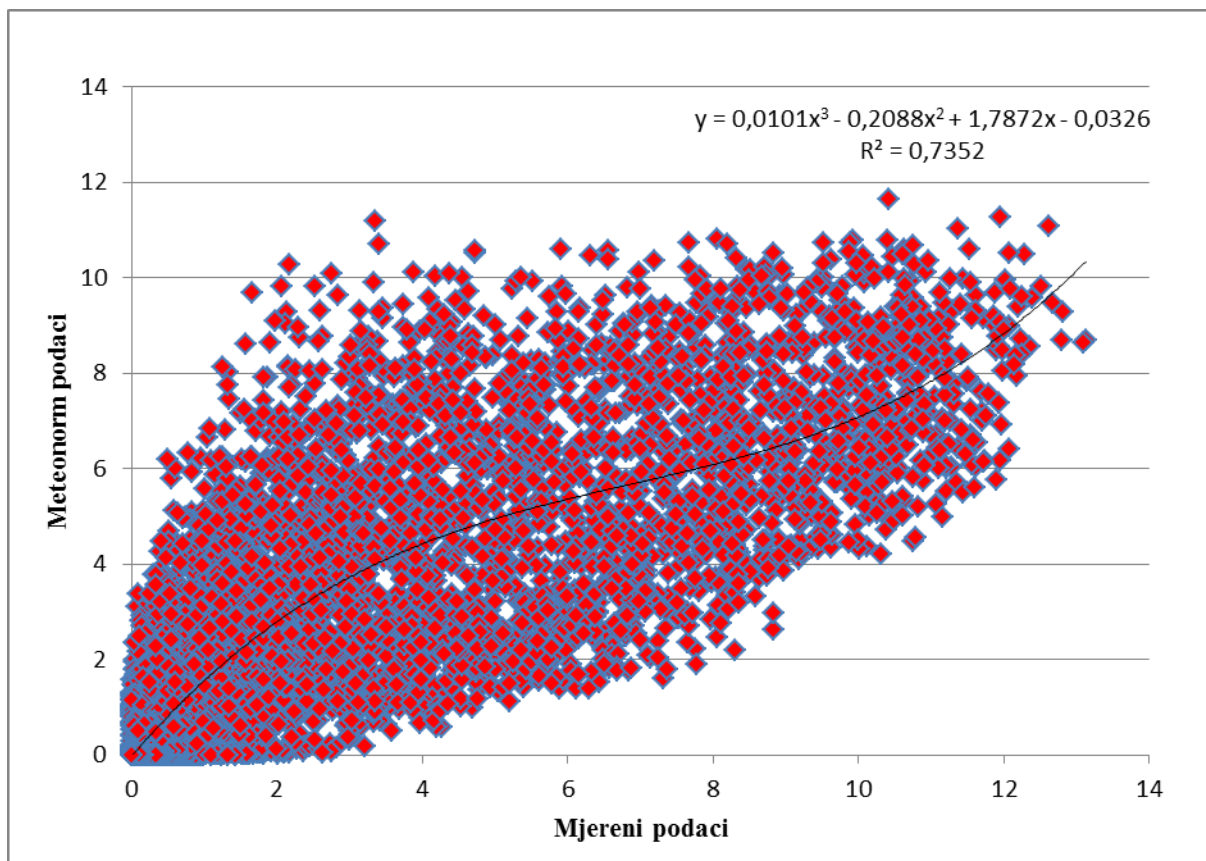
$$E_{EP} = E_{EP,h} * 14$$



Slika 21. Prikaz usporedbe podataka o relativnoj proizvodnji električne energije iz mjerenih izvora, podataka o relativnoj dozračenoj energiji iz baza Meteororma te distribucije iz EnergyPlana u bezdimenzijskom obliku

Pogreška koja je nastala korištenjem nepotpunih mjerenih podataka o proizvodnji električne energije iz svih analiziranih elektrana ocjenjuje se usporedbom tih podataka s podacima o dozračenoj energiji iz baza Meteororma. Ova usporedba je između različitih vremenskih razdoblja, ali procjenjuje se da je dozračena energija za 2005. iz baza Meteororma proporcionalna dozračenoj energiji za 2014. godinu. S tom pretpostavkom računa se koeficijent korelacije R^2 čiji će iznos dati uvid o odstupanjima ovih navedenih izvora podataka.

Podaci o različitosti ovih dvaju izvora podataka prikazani su na slici 22. Uspoređivani podaci su u bezdimenzijskim vrijednostima iz satnih rezolucija prikaza proizvodnje električne energije i dozračene energije.



Slika 22. Usporedba podataka mjerenih podataka i podataka iz baza Meteonorma za sve analizirane elektrane

Na slici 22. podaci o mjerenoj proizvodnji električne energije svih 14 analiziranih elektrana nalaze se na apcisi, a podaci o dozračenoj energiji za isti sat u godini nalaze se na ordinati i njihovo presjecište označava jednu točku prikazanu na grafikonu. Iz toga proizlazi da je prikazano 8760 različitih točaka, po jedna za svaki sat u godini. Iz tog skupa točaka traži se krivulja koja će najbolje aproksimirati ove vrijednosti i preko nje traži se koeficijent korelacije koji prikazuje međusobno poklapanje ovih vrijednosti.

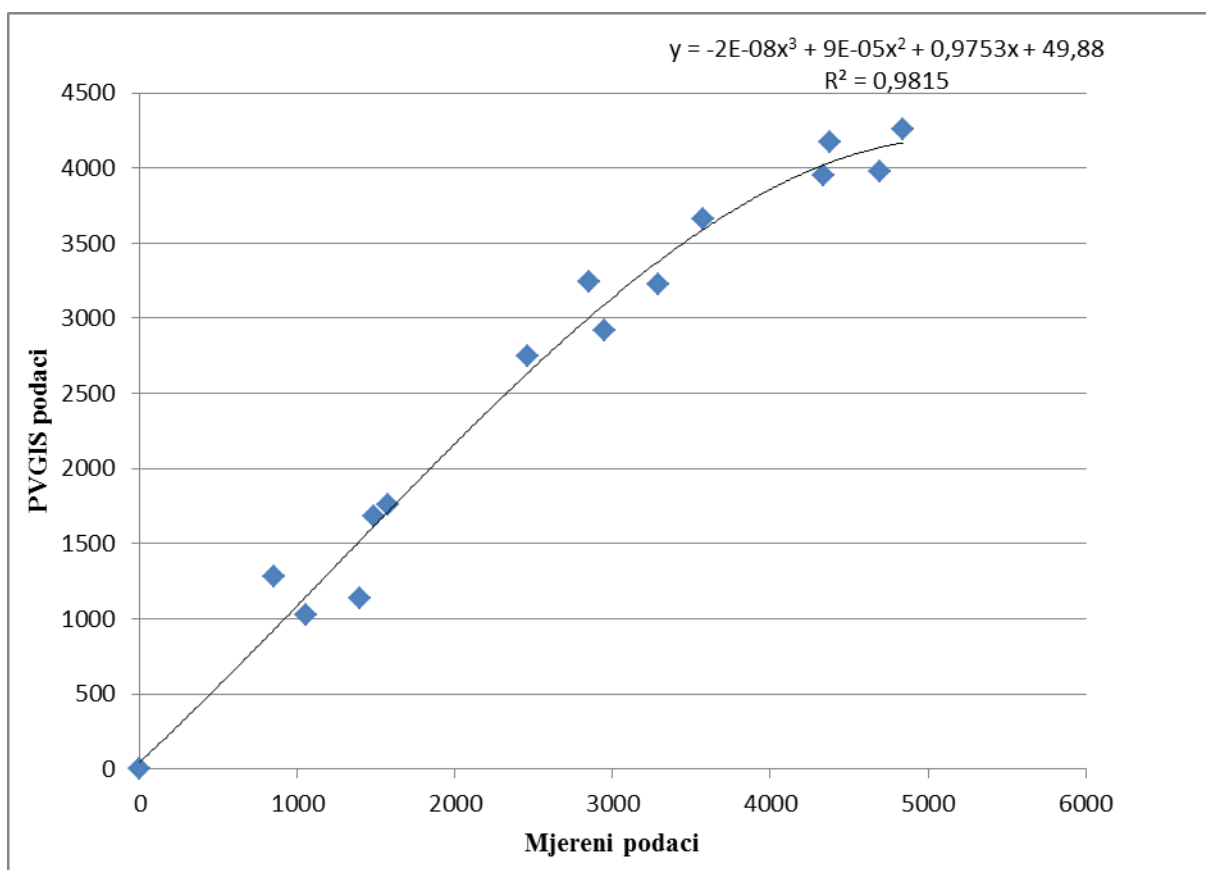
Za prikaz izabrana je krivulja 3. reda koja glasi:

$$y = 0,0101x^3 - 0,2088x^2 + 1,7872x - 0,0326;$$

a koeficijent korelacije R^2 iznosi 0,7352.

Svaka krivulja višeg reda bolje bi aproksimirala vrijednosti na slici ali to povećava složenost izračuna koeficijenta korelacije, a nema veliki utjecaj na prikaz međusobnog odstupanja podataka.

Kad se koeficijent korelacije prikaže u postocima iznosi 73,52%, što je iznad 70%, a to znači da je povezanost podataka o proizvedenoj električnoj energiji svih sunčanih elektrana preuzetih sa stranica sunnyportala i podataka o dozračenju energiji preuzetih iz baza Meteonorma visoka. Ovakva procjena usklađenosti izvora podataka može se i procijeniti za mjerene podatke i podatke iz PVGIS-a. Primjer ovakve usporedbe dvaju izvora podataka između mjerenih podataka i podataka s PVGIS-a u slučaju sunčane elektrane INES u mjesečnoj rezoluciji prikazan je na slici 23.



Slika 23. Usporedba podataka mjerenih podataka i podataka iz PVGIS-a za slučaj sunčane elektrane INES

Na slici 23. uneseni su podaci o mjesečnim proizvodnjama sunčane elektrane INES dobiveni mjerenjem i iz PVGIS-a. Vidljivo je skoro potpuno poklapanje tih dvaju izvora podataka kad se radi o mjesečnoj rezoluciji i iznos koeficijenta korelacije jednak je 98,15 %. Ovakav visok iznos koeficijenta korelacije može se uočiti i na grafikonu 11. prateći samo podatke o mjerenju i podatke iz PVGIS-a.

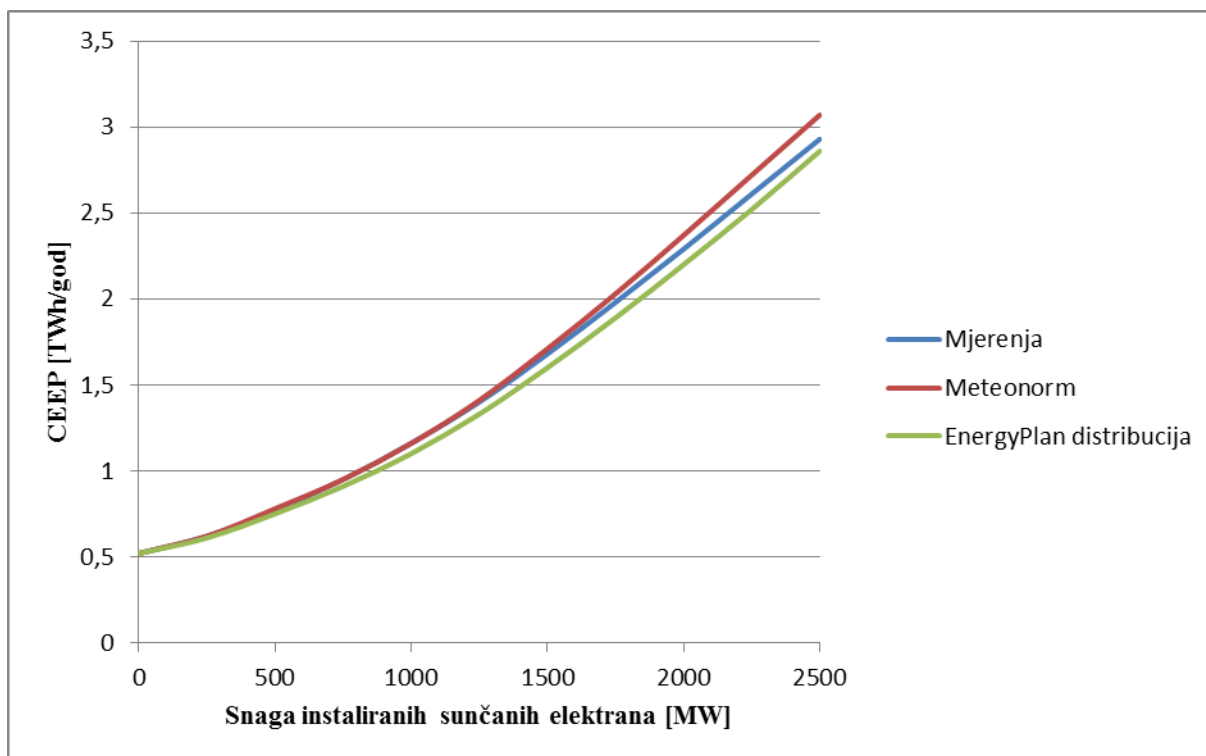
4.3 Mogućnost integracije električne energije iz sunčanih elektrana

Mogućnost integracije električne energije procjenjuje se u EnergyPlan programu analizom CEEP-a. CEEP (*critical excess electricity production*) označava „kritični“ višak proizvedene električne energije u jednoj godini. Model ovu energiju opisuje kao razliku između ukupnog proračunatog izvoza i definiranog kapaciteta izvoza, tj. svojevrsni višak izvezeno električne energije. Prikazuje se u jedinici TWh/god.

U EnergyPlanu je korišten scenarij „PLAVI-2020-H1“ uzete iz završnog rada „Analiza utjecaja izgradnje vjetroelektrana i fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske“ autora Ivana Komušanca. U scenariju je promijenjena optimizacija iz tržišne („Market Economic Optimisation“) u tehničku optimizaciju („Technical Optimisation“) za zatvoreni elektroenergetski sustav. Vrijednosti prijenosnih kapaciteta su 0, odnosno nema izvoza i uvoza električne energije.

Prilikom analize CEEP-a procijenjena je instalirana snaga vjetroelektrana od 2050 MW koja se je u svim analizama držala konstantnom. Razlog odabira ove instalirane snage vjetroelektrana je u scenariju „PLAVI-2020-H1“ gdje se ta snaga pokazala „dobrim odabirom“ te je odlučeno da se ona zadrži [10]. Instalirani kapaciteti sunčanih elektrana mijenjani su od 0 do 2500 MW s korakom od 250 MW. Podaci o potrošnji električne energije korišteni su za 2014. godinu i prikazani su na slici 12. Potrošnja električne energije 2014. godine iznosila je 16,9 TWh za Republiku Hrvatsku a procjenjuje se da bi ona mogla blago padati u sljedećim godinama. Napravljena su 3 različita scenarija u kojima su mijenjane distribucije u EnergyPlanu koristeći distribuciju sunčanih elektrana u Republici Hrvatskoj iz

EnergyPlana opisanu u poglavlju 3.4, zatim distribuciju o proizvodnji 14 analiziranih elektrana iz baza Meteonorma i distribuciju o mjerenim podacima o proizvodnji 14 analiziranih elektrana.



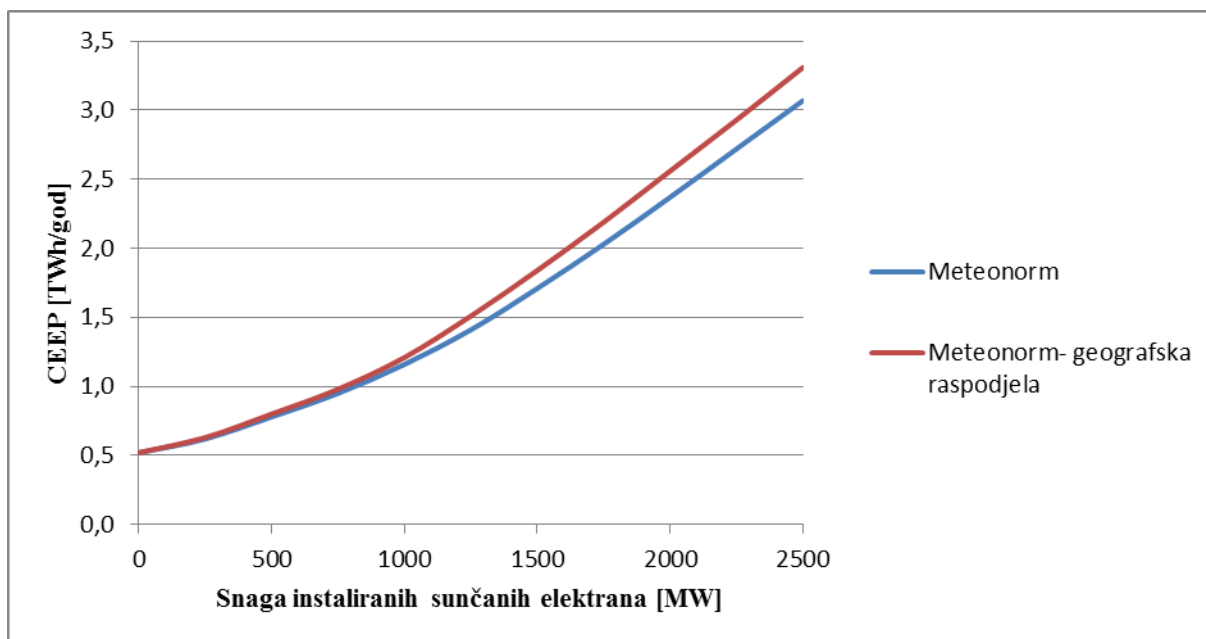
Slika 24. Rast CEEP-a u ovisnosti i kapacitetima instaliranih sunčanih elektrana

Iz slike 24. vidljivo je kako rast kapaciteta sunčanih elektrana uzrokuje viši CEEP, što je i glavni razlog njegove pojave. Krivulje distribucija iz različitih izvora podataka međusobno se previše ne razlikuju što je razlog dobrog poklapanja podataka objašnjenog u poglavlju 4.2. Kod 0 MW instalirane snage sunčanih elektrana CEEP iznosi 0,52 TWh za sva tri izvora podataka, a kod instalirane snage sunčanih elektrana od 2 500 MW razlika CEEP-a između podataka iz baza Meteonorma i EnergyPlan distribucije iznosi 190 GWh.

Zanimljivo je proučiti geografsku raspodjelu sunčanih elektrana po Republici Hrvatskoj i odnos CEEP-a zbog utjecaja sunčanih sati.

Takva raspodjela je napravljena pomoću podataka o proizvedenoj električnoj energiji preuzetih sa Sunnyportala te podataka o dozračenju energiji iz baza Meteonorma gdje su

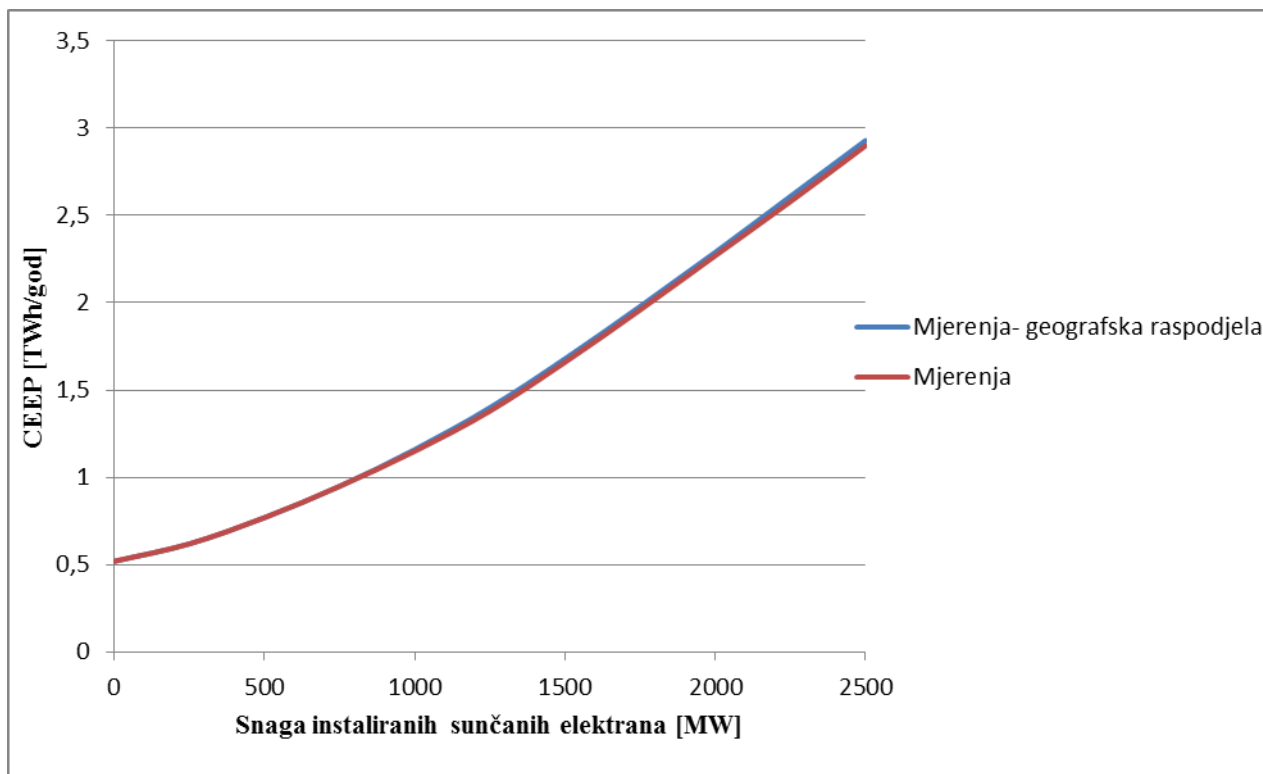
podaci o proizvedenoj električnoj energiji i dozračenoj energiji za lokacije elektrana smještenih u priobalnom dijelu RH (FN sustav IZO staklo, sunčana elektrana Njivice i sunčana elektrana Kozjak) uvećani za 3 puta, a podaci o dozračenoj energiji elektrana smještenih u kontinentalnom dijelu su nadomješteni s razlikom između ukupnog zračenja koje je dobiveno analizom svih sunčanih elektrana prikazano jednadžbom 2.



Slika 25. Rast CEEP-a u ovisnosti o kapacitetima instaliranih sunčanih elektrana i geografskoj lokaciji elektrana za usporedbu dozračene energije iz baza Meteonorma

Na gore prikazanoj slici plava linija (Meteonorm) prikazuje raspodjelu zračenja koja se dobiva analizom svih sunčanih elektrana koristeći podatke iz Meteonorma dok crvena linija (Meteonorm- geografska raspodjela) prikazuje slučaj ponašanja CEEP-a s povećanim udjelom elektrana smještenih u priobalnom dijelu Republike Hrvatske. Iz toga se primjećuje da lokacija, odnosno geografski položaj instaliranih sunčanih elektrana, ne utječe značajno na iznos CEEP-a u promatranom slučaju. Utjecaj se može primijetiti tek kod velikih instaliranih snaga od 1000 MW i veće. Kod snage od 1000 MW instaliranih sunčanih elektrana razlika CEEP-a je svega 0,05 TWh, a porastom snage sunčanih elektrana na 2000 MW razlika CEEP-a se povećava na 0,19 TWh. Tomu je razlog mali broj analiziranih elektrana smještenih u

priobalnom području, svega 3 elektrane, te skoro jednolika raspodjela zračenja po cijelom teritoriju RH na kojem su smještene instalirane elektrane.



Slika 26. Rast CEEP-a u ovisnosti o kapacitetima instaliranih sunčanih elektrana i geografskoj lokaciji elektrana za usporedbu podataka o proizvedenoj električnoj energiji preuzetih sa Sunnyportal

Na gore prikazanoj slici crvena linija (Mjerenja) prikazuje raspodjelu proizvedene električne energije koja se dobiva analizom svih odabranih sunčanih elektrana koristeći podatke preuzete sa Sunnyportal dok plava linija (Mjerenja- geografska raspodjela) prikazuje slučaj ponašanja CEEP-a s povećanim udjelom elektrana smještenih u priobalnom dijelu Republike Hrvatske. Iz ove slike primjećuje se da lokacija, odnosno geografski položaj instaliranih sunčanih elektrana skoro uopće ne utječe na iznos CEEP-a u promatranom slučaju. Kod snage od 1000 MW instaliranih elektrana razlika CEEP-a je jedva primjetnih 10 GWh, a porastom snage sunčanih elektrana na 2500 MW razlika CEEP-a se povećava na 30 GWh. Uvriježeno mišljenje je da geografska raspodjela pridonosi integraciji sunčanih elektrana, ali sudeći po slici 26. u ovom slučaju to nije tako. Kao i u slučaju slike 25., tomu je razlog mali broj analiziranih elektrana smještenih u priobalnom području, svega 3 elektrane, te skoro jednolika raspodjela zračenja po cijelom teritoriju RH na kojem su smještene instalirane elektrane.

5. ZAKLJUČAK

Obnovljivi izvori energije budućnost su za cijeli svijet pa tako i za Republiku Hrvatsku. Ovaj rad pokazuje da je Republika Hrvatska pogodno tlo za instalaciju sunčanih elektrana što najviše može zahvaliti svojem geografskom položaju i klimi.

Analiza mjerenih podataka o proizvodnji električne energije, podataka o dozračenju energiji iz baza PVGIS-a i Meteonorma pokazala je da postoji visoka povezanost između ovih izvora te da se ovi izvori podataka mogu koristiti pri projektiranju proizvodnje električne energije. Koeficijent korelacije kod usporedbe mjerenih podataka o proizvodnji električne energije i podataka preuzetih s PVGIS-a iznosi 98,15%, a kod usporedbe mjerenih podataka i podataka iz baza Meteonorma 73,52%. RH bi svakako trebala raditi na tome da u skorije vrijeme povećava kapacitete sunčanih elektrana. S 50 MW koliko ima trenutno, može se reći da su sunčane elektrane tek u početku uvođenja u hrvatski elektroenergetski sustav. Analiza je također pokazala da je u zimskom razdoblju proizvodnja ovih elektrana osjetno niža, kao što je to u slučaju jedne analizirane elektrane prikazano na slici 3., ali usprkos tome kroz ostatak godine ove elektrane imaju utjecaj. Analiza proizvodnje sunčane elektrane Solarni stup Špansko, koja radi s dvoosnim praćenjem Sunca, pokazuje da sunčane elektrane s dvoosnim praćenjem postižu maksimalne satne proizvodnje električne energije kroz cijelu godinu što ih čini optimalnim izborom glede potrošnje električne energije kako vidljivo na slici 17. Ekonomsku isplativost bi trebalo daljnje analizirati.

EnergyPlan je u analizi CEEP-a pokazao da ima puno mjesta za sunčane elektrane u hrvatskom elektroenergetskom sustavu ali i da geografski položaj sunčanih elektrana ne utječe pretjerano na iznos CEEP-a, budući da razlika CEEP-a prikazana na slici 25. u slučaju korištenja podataka iz Meteonorma kod 2 000 MW instalirane snage sunčanih elektrana iznosi samo 190 GWh. Kod korištenja mjerenih podataka o proizvodnji električne energije analiza CEEP-a je također pokazala da geografska raspodjela nema skoro nikakav utjecaj na području Republike Hrvatske kako je i prikazano na slici 26.

6. LITERATURA

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrvatska#cite_note-67
- [2] http://www.dzs.hr/Hrv/censuses/census2011/results/htm/H01_01_04/h01_01_04_RH.html
- [3] <http://www.adriagate.com/Hrvatska-hr/Pomoc/Klima-Hrvatska>
- [4] Ministry of Economy Labour and Entrepreneurship. Energy in Croatia – Annual Energy
- [5] Report – 2009, Zagreb, Croatia; 2010
- [6] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Insolacija#/media/File:SolarGIS-Solar-map-Croatiaen.png>
- [7] www.sunnyportal.com
- [8] <http://www.meteonorm.com/>
- [9] <http://photovoltaic-software.com/pvgis.php>
- [10] Komušanac I. Analiza utjecaja izgradnje vjetroelektrana i fotonaponskih sustava na opterećenje elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske, 2015.
- [11] <http://www.croenergo.eu/Hrvatska-energetika-u-2014-Uvoz-elektricne-energije-13-plina-417;-godinu-obiljezio-daljnji-pad-potrosnje-27450.aspx#>
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_tracker

PRILOZI

I. CD-R disc